THÈSE
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES
École doctorale : SHPT - Sciences de l'homme, du Politique et du Territoire
Spécialité : Sociologie
Unité de recherche : Pacte, Laboratoire de sciences sociales

Déployer l'IA dans l'industrie du semiconducteur : propagation de promesses, pratiques de conception et reconfigurations du travail

Deploying AI in the semiconductor industry: propagation of promises, design practices and work reconfigurations

Présentée par :

Louis DEVILLAINE

Direction de thèse :

Thomas REVERDY PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble-Alpes	Directeur de thèse
Thierry MENISSIER PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble-Alpes	Co-directeur de thèse

Rapporteurs :

Gwenaële ROT
PROFESSEURE DES UNIVERSITES, Sciences Po, Centre de sociologie des organisations – CNRS
Pascal UGHETTO
PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Gustave Eiffel

Thèse soutenue publiquement le **3 février 2026**, devant le jury composé de :

Yann FERGUSON, DOCTEUR EN SCIENCES, Inria, associé au Certop (Université Toulouse 2)	Examinateur
Thierry MENISSIER, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble-Alpes	Co-directeur de thèse
Thomas REVERDY, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble-Alpes	Directeur de thèse
Gwenaële ROT, PROFESSEURE DES UNIVERSITES, Sciences Po, Centre de sociologie des organisations – CNRS	Rapporteure
Véronique STEYER, PROFESSEURE, Ecole polytechnique	Présidente du jury
Pascal UGHETTO, PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Gustave Eiffel	Rapporteur
Dominique VINCK, PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE, Université de Lausanne	Examinateur

Invités :

Dominique GOUBIER
INGENIEUR, coordinateur du projet StorAIge

Table des matières

TABLE DES MATIERES 3

REMERCIEMENTS 6

RESUME 10

SUMMARY 11

LISTE DES FIGURES 12

LISTE DES TABLEAUX 15

GLOSSAIRE 16

INTRODUCTION 18

1. DES ELEMENTS DE CONTEXTE 19
   1.a. Explosion médiatique 19
   1.b. L'IA comme instrument stratégique de la politique industrielle française 20
   1.c. Entre enjeux économiques et enjeux du travail et de son organisation 21
   1.d. Transformations numériques des organisations industrielles 22
2. SE SAISIR DE L'IA, SE PLONGER DANS L'INDUSTRIE : DIRE LES TERMES DU SUJET 24
   2.a. Définition scientifique de l'IA, introduction aux techniques de l'IA 24
   2.b. Rendre compte de l'éventail des discours sur l'IA 28
   2.c. Définir les activités industrielles 31
3. S'ENTOURER THEORIQUEMENT POUR REFLECHIR AUX TRANSFORMATIONS NUMERIQUES DES ORGANISATIONS INDUSTRIELLES 32
   3.a. L'héritage de la théorie sociotechnique 33
   3.b. Les apports de la sociologie de la traduction 35
   3.c. S'ancrer dans la posture constructiviste pour intégrer la question du travail 37
4. UNE ETUDE ETHNOGRAPHIQUE DANS L'INDUSTRIE DE LA MICRO-ELECTRONIQUE 42
   4.a. Contexte institutionnel et pratique de la thèse 42
   4.b. Méthodologie 44
   4.c. Vie et traitement des données d'enquête 48
   4.d. Une enquête complémentaire à Mecanex, entreprise d'équipements mécaniques 51
   4.e. Positionnement personnel 52
5. CONVENTIONS ADOPTEES 56
6. PLAN DE LA THESE 58

CHAPITRE I – REVOLUTION INDUSTRIELLE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : RECOMBINAISONS DE PROMESSES POUR UNE INDUSTRIE DU FUTUR 60

1. CIRCULATION DES RECITS ENTRE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET INDUSTRIE 66
   1.a. La promesse comme expression du registre déterministe 67
   1.b. IA et promesse technoscientifique 73
   1.c. Appropriation des promesses de l'IA par le récit de l'Industrie 4.0 78
   1.d. Une révolution inéluctable qui demande des réponses urgentes ? Un rapport au temps singularisé 84
   Conclusion (I.1) 92
2. CONTENU DES PROMESSES ET ATTENTES VEHICULEES PAR L'IA DANS L'INDUSTRIE 93
   2.a. Mettre en scène la comparaison humain-machine au travers de systèmes « efficaces » et « objectifs » 94
   2.b. Augmenter l'industrie, la promesse économique 103
   2.c. Libérer le travail, libérer du travail 109
   Conclusion (I.2) 115
3. L'INDUSTRIE DU SEMICONDUCTEUR COMME ACTEUR DE LA DIFFUSION DES PROMESSES TECHNOLOGIQUES 117
   3.a. L'industrie de la micro-électronique comme secteur stratégique 118
   3.b. Le rôle de l'industrie de la micro-électronique dans le façonnement des promesses de l'IA .. 127

3.c. Alimenter la promesse de l'IA à l'échelon européen : un cas d'étude autour d'un projet industriel européen *133*
Conclusion (I.3) *136*

CHAPITRE II – DIFFUSION, PROPAGATION, ET APPROPRIATION DES PROMESSES DE L'IA DANS L'INDUSTRIE DU SEMICONDUCTEUR **137**

1. DRESSER LE TABLEAU ORGANISATIONNEL DE L'INDUSTRIE DE LA MICRO-ELECTRONIQUE 141
1.a. Eléments préliminaires concernant les dispositifs à semiconducteurs *143*
1.b. Micro-électronique, maxi-loupes : fabriquer les semiconducteurs dans un univers technologiquement médié *147*
1.c. Le travail de la qualité dans l'industrie du semiconducteur : une chaîne d'analyse *156*
Conclusion (I.1) *162*
2. CONCILIER LES PROMESSES : LA COHABITATION DES DISCOURS DANS LE TRAVAIL DE LA QUALITE DU SEMICONDUCTEUR 163
2.a. Le sujet de l'IA comme cristallisation d'un conflit de rationalité *166*
2.b. Faire accepter l'IA *172*
Conclusion (II.2) *179*
3. REAPPROPRIATION DES PROMESSES DE L'IA PAR LES MANAGERS DE L'INDUSTRIE 180
3.a. La servitisation : quand l'IA accompagne les changements de modèle d'affaire *182*
3.b. Envisager les modalités du changement sous le prisme du récit du renouveau industriel *186*
3.c. Quel statut pour l'IA dans l'écosystème technique ? *195*
3.d. Comment l'IA remet en débat la question de la compétence des salariés *199*
Conclusion (II.3) *207*

CHAPITRE III – METTRE EN ŒUVRE L'IA INDUSTRIELLE : UN TRAVAIL DES SAVOIRS **209**

1. INTRODUIRE L'IA DANS L'ESPACE DE TRAVAIL : UN POSITIONNEMENT PAR RAPPORT A L'EXISTANT A CONSTRUIRE 216
1.a. Bâtir un projet d'IA : velléités d'automatisation multi-échelles *217*
1.b. Mettre à profit une infrastructure technique de la donnée *224*
1.c. Devenir expert en mégadonnées *228*
Conclusion (III.1) *234*
2. CONCEVOIR UN SYSTEME D'IA : UN TRAVAIL EPISTEMIQUE DE LA DONNEE 235
2.a. Décomposer le travail de la base de données *237*
2.b. Activités épistémiques dans la conception de la base de données : catégorisation, annotation, peuplement *243*
2.c. Généalogie partielle d'une base de données : concevoir l'IA, concevoir le travail *251*
Conclusion (III.2) *258*
3. TRANSFERT OU RECONSTRUCTION DE SAVOIRS ? DES SITUATIONS EMPIRIQUES DE CONCEPTION DU CLASSIFIMOTIF 259
3.a. Nettoyer des bases de données synthétiques *261*
3.b. La réunion des spirales : histoire mouvementée de l'élaboration d'une catégorie *268*
Conclusion (III.3) *276*
4. EVALUER ET AMELIORER LES SYSTEMES D'IA : ENTRE PERFORMANCE TECHNIQUE ET CONTRAINTES ORGANISATIONNELLES 277
4.a. Une évaluation objectivée de l'IA *282*
4.b. Améliorer le système d'IA : une maintenance épistémique *290*
4.c. Une performance multi-dimensionnelle : aligner le système sur l'organisation *296*
Conclusion (III.4) *301*

CHAPITRE IV – CONFIGURATIONS ET RECONFIGURATIONS DU TRAVAIL DE LA SALLE BLANCHE A L'HEURE DE L'IA **303**

1. COMPETENCE ET AUTONOMIE DES TECHNICIENS QUALITE AU PRISME DE L'AUTOMATISATION DU TRAVAIL 311
1.a. S'inscrire dans la chaîne d'analyse qualité : une activité d'enquête *314*
1.b. Maintenir son autonomie dans un univers numérisé *322*
1.c. Entre apprentissage et procédurisation du travail de technicien : faire les frais de l'automatisation *328*
Conclusion (IV.1) *335*
2. DYNAMIQUES DE COOPERATION ENTRE LA SALLE BLANCHE ET LES BUREAUX 336

2.a. Coopérer dans la salle et avec l'extérieur : un travail d'empathie *337*
2.b. Un triple cloisonnement contre la coopération dans le changement technologique *342*
Conclusion (IV.2) *348*

CONCLUSION **349**

1. CONTRIBUTIONS PRINCIPALES 349
2. LIMITES DE LA THESE 352
3. PERSPECTIVES DE RECHERCHE : L'IA DANS L'INDUSTRIE, ET APRES ? 354
4. EPILOGUE : POUR UNE ETHIQUE DU DEPLOIEMENT TECHNOLOGIQUE 357
4.a. Morale et changement technologique *357*
4.b. L'organisation du travail comme impensé des débats contemporains... ..... *358*
4.c. Concevoir le changement technologique comme un enjeu éthique *360*
4.d. Démocratie au travail et technologie *363*
4.e. Quelles voies pour les salariés pour le futur de l'IA dans le travail ? *365*

BIBLIOGRAPHIE **369**

ANNEXES **402**

1. ENQUETE ETHNOGRAPHIQUE A SEMICORP 403
2. ENQUETE PAR ENTRETIENS A MECANEX 407
3. CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES REALISEES AU COURS DE LA THESE 411

Remerciements

Lire les remerciements des thèses, je dois l'avouer, c'est un peu mon péché mignon… Alors que vient mon tour d'écrire ma reconnaissance, je me remémore de toutes les personnes qui ont donné de leur temps pour moi, de toutes celles et tous ceux qui m'ont soutenu et accompagné dans ce parcours. Et vous êtes beaucoup, car une thèse ne s'écrit pas seul(e).
Alors merci :

- A mes co-directeurs de thèse, Thomas Reverdy et Thierry Ménissier, pour m'avoir fait confiance de bout en bout dans cette aventure. Merci Thomas de m'avoir appris à lire, voir et raisonner en sociologue. Ta lecture a toujours été bienveillante et constructive. J'ai pris beaucoup de plaisir à nos échanges tout au long de nos entrevues dans ton bureau. De nombreuses idées présentes dans la thèse y ont émergé, et cette thèse te doit beaucoup. J'ai beaucoup de chance d'avoir été suivi et formé par toi. Merci Thierry de m'avoir introduit au monde de la recherche et ses expériences collectives. Très vite, tu m'as confié des responsabilités au sein de la Chaire – je pense en particulier à notre grande fierté, la conférence sur l'IA et le travail avec Chloé et Dakota, un super moment – des expériences qui m'ont beaucoup appris et donné confiance pour la suite. Au rugby comme à la Chaire, tu joues toujours collectif. La participation à la vie de la Chaire Ethique & IA sous ton mentorat a pour moi été un grand bonheur.
- A l'ensemble des membres du jury, pour avoir accepté de contribuer à l'évaluation de mon travail. Je remercie d'abord Gwenaële Rot et Pascal Ughetto d'avoir assumé la lourde responsabilité de rapporteur·rices de la thèse. Vos rapports, très détaillés, m'ont ouvert de nombreuses pistes pour la suite. Je remercie également Yann Ferguson et Dominique Vinck, examinateurs de la thèse, pour avoir contribué à l'approfondissement de mes recherches. Je retiens de vos interventions une profusion de questions à garder dans un coin de ma tête pour le futur. Merci enfin à Véronique Steyer d'avoir accepté de présider le jury, votre lecture précise et riche du manuscrit m'encourage à poursuivre le travail avec un regard renouvelé.
- A l'équipe de pilotage du projet StorAIge, et en particulier à Dominique Goubier qui a accepté de participer au jury de la thèse. L'initiative de faire une place aux sciences humaines et sociales au sein de tels projets est encore rare. Sans cela, il est clair que cette thèse n'aurait jamais vu le jour.
- J'en profite également pour remercier Sacha Loeve, qui m'a donné connaissance de cette offre de poste à la suite d'une soutenance de mémoire en ligne avec Jean-Baptiste Joinet dont je me souviens encore vivement.
- Aux membres de mon CSI, Amélie Artis et Jamil Sayah, pour leur écoute lors de nos rencontres annuelles, j'en suis toujours ressorti avec des conseils précieux.
- A mes professeurs de la SICOM, Laurent Ros et Bertrand Rivet, pour leurs enseignements et leur suivi irréprochable des étudiant·es, mais aussi pour avoir pris au sérieux mon inconsciente dérive vers les sciences sociales et m'avoir permis de la partager auprès des futur·es ingénieur·es de la filière.
- A mon tuteur de stage de PFE et ami, Etienne Labyt, pour m'avoir ouvert en grand les portes de la recherche au CEA et m'y avoir tant donné goût.
- A Hélène Burgy, Catalina Esparza, Annaïck Moreau, Samya Kalbaoui, et Lourdemarie Luette pour leur accompagnement administratif sans faille tout au long du labyrinthe du contrat doctoral, à Pacte, à l'école doctorale SHPT ou à l'UGA. Grâce à vous, je ne m'y suis jamais senti perdu.
- A l'ensemble des personnels des bibliothèques universitaires et municipales de Grenoble, à Chavant comme à la BU Droit-Lettres, pour m'avoir offert des espaces de sérénité où des pourcentages conséquents de la thèse ont été rédigés.

- Aux salarié·es des restaurants universitaires l'Intermezzo et Diderot, toujours plein·es d'énergie, qui m'ont épargné l'effort de la cuisine du midi.
- A toutes les équipes derrière le développement de QualCoder et Zotero, et de Tadddam à l'UGA, aux contributeur·rices de Wikipédia et du super dictionnaire de synonymes CRISCO, aux pair·es relecteur·rices des revues aux discutant·es des colloques du monde entier, à Alexandra Elbakyan pour l'ensemble de Scion-Hubvre. Ces réalisations, bénévoles ou non, rendent la vie scientifique plus douce et lui donnent véritablement sens.
- Aux enquêté·es, et plus largement à toutes les personnes qui ont accepté à un moment où un autre de répondre à mes questions, de me parler de leur travail, de leurs points de vue, de leurs difficultés parfois, de leurs succès aussi. J'ai passé avec certain·es d'entre vous des heures, voire des dizaines d'heures, qui m'ont été toujours agréables et stimulantes. Cette thèse ne serait rien sans vous, et même si je ne peux vous citer, je vous suis très reconnaissant.
- Aux collègues qui ont, à un moment ou un autre, relu mon travail avec justesse et gentillesse pour me faire des retours : Anne-Gaëlle Guérin, Marie Ghis-Malfilâtre, Pascale Trompette. Au passage, je remercie Maëva Leulier-Blanchard et Jean-Baptiste Devaux d'avoir organisé le séminaire doctoral à Pacte où j'ai pu présenter mon chapitre 2, qui s'est vu sensiblement remanié dans la foulée.
- A la fine équipe de Pacte de l'îlot urbain de Génie Industriel, et en particulier à Céline Cholez et Mathilde Mondon-Navazo pour les attentions, les conseils, les sourires compatissants et les conversations fugaces ou plus approfondies. Je remercie également Séverine Louvel pour son implication dans la vie de l'équipe Régulations dans laquelle j'ai été accueilli tout au long de la thèse.
- Aux ex-doctorants de Thomas, Michaël Fernandez, Corentin Gariel, Vincent Jourdain, désormais docteurs et auprès de qui, dès le début, j'ai beaucoup appris en observant. Je pense aussi à Anne-Gaëlle (encore !) et à notre fameux TD Challenger, et bien sûr à Nathan Coutable, qui reprend le flambeau de l'IA dans les organisations, bon courage et bonne thèse !
- A Gérald Gaglio et Lucile Sassatelli, pour leur confiance et leur accompagnement dans ma nouvelle aventure niçoise, comme enseignant-chercheur au sein de l'Université Côte d'Azur, entre le GREDEG et l'EFELIA Côte d'Azur.
- A mes nouveaux collègues de la MSHS Sud-Est et en particulier à Sylvain Juanes qui m'y a chaleureusement accueilli, ainsi que Basile Clerc, Marius Garreau, Idriss Najjar, Gwenaëlle Prigent et Baptiste Rege pour leur aide dans la préparation de la soutenance.
- A celles et ceux, qui justement, m'ont donné de leur temps pour peaufiner la soutenance : Chloé Bonifas, Léa Chauvière, Nathan Coutable, Ambre Davat, Anne-Gaëlle Guérin (forcément), Suzanne Guillou et Zoé Zerbib.
- A tous·tes mes ami·es de l'Atelier Pomodoro avec qui nous nous sommes serré les coudes les mercredis et les vendredis, en 108. Je remercie en particulier Maëva et Elise pour l'organisation générale, et puis Antoine, Aurel, Dina, Emma, Emilie, Jessica, Joseph, Julia, Livia, Marion, Morgane, Ola, Romain, Salomé, Sophie et Théo.
- Aux « jeunes » de la Chaire Ethique & IA, bouillon disciplinaire hyper stimulant : Alexandre Bretel, Ambre Davat, Antonin Chaplet, Dakota Root, Eugène Favier-Baron, Léa Chauvière, Léo Taliercio, Seddik Benlaksira, Tyler Reigeluth, Ummihan Ozturk. Un merci tout spécial à Chloé Bonifas, ma co-labo' des débuts, avec qui nous avons partagé tout au long de la thèse des cocktails de sentiments colorés à base de : *je suis feignant*, *hé je bosse bien en ce moment*, *j'arrive à rien*, *stylé ce qu'on a fait quand même*.
- A mes amis Roman Malo et Éric Pardoux qui ont été mes premiers compagnons d'écriture et de communication scientifique transdisciplinaire. Quel bonheur de travailler ensemble !

- A mon ami Pierre Crépel, infatigable archiviste et indéboulonnable cycliste, dont l'érudition n'a d'égale que l'humilité, qui m'accompagne dans mon périple au rythme du calendrier de l'ASBLA.
- Aux artistes nombreux·ses qui ont accompagné mes sessions de travail et de procrastination. Impossible de travailler sans musique, et la vôtre m'a concentré, inspiré, motivé : *3Force*, *Aeronexus*, *Alex*, *Anniee*, *Carbon Killer*, *Carpenter Brut*, *Caspro*, *Cat Temper*, *CXNTRAST*, *Dan Terminus*, *Dana Jean Phoenix*, *DANCE WITH THE DEAD*, *Daniel Deluxe*, *Dav Dralleon*, *Dead Astronauts*, *Dead Tesla*, *DEADLIFE*, *Death Selektor*, *Donbor*, *Fixions*, *Gost*, *Grimlin*, *GUNSHIP*, *Hollywood Burns*, *Inexedra*, *Introspect*, *IRVING FORCE*, *Isidor*, *JEREMIAH KANE*, *Jordan F*, *Judge Bitch*, *Kick Puncher*, *KING STEPHEN*, *Lazerhawk*, *LAZERPUNK*, *Le Matos*, *Let Em Riot*, *Lord of the Lost*, *LukHash*, *Lyde*, *Magic Sword*, *MASKED*, *MASTER BOOT RECORD, Mega Drive*, *Mercury 82*, *Misanthropix*, *Natsukime*, *Neon Nox*, *Neoslave*, *Neuromancer*, *Night Tempo*, *Occams Laser*, *ORAX*, *OSC*, *Oscillian*, *Perturbator*, *Power Glove*, *Powernerd*, *Quixotic*, *Robert Parker*, *ROBORG*, *Satellite Young*, *Shredder 1984*, *Shyguys*, *Siderunda*, *Sierra*, *SiLANCE*, *Starfounder*, *STEALTH*, *Stilz*, *Straplocked*, *Street Cleaner*, *Surgeryhead*, *The Rezonator*, *Thomas Azier*, *Thomas Barrandier*, *Tokyo Rose*, *TOMMY '86*, *TONEBOX*, *Volkor X*, *Vosto*, *Vulta*, *Waveshaper*, *We are Magonia*, *Wice*, *Yota*, *Zlovizor*, *Zombie Hyperdrive*.
- A tous·tes celles et ceux que j'ai eu le bonheur de côtoyer tout au long de ma vie d'élève et d'étudiant. A Chantonnay avec la ferme en folie : Andréa, Baptiste, Cédric, Charlie, Christopher, Guillaume, Kévin, Mathieu, Roman, Sébastien ; à Nantes avec la bande de malpropres : Alex, Brieuc, Gurvan, Hugo, Jules, Léo, Yohan ; à Grenoble avec Alexis et la team MC qui s'est battue pour être en coloc avec moi : Charline, Luc, Matthias, Stephen, Vincent ; et puis, à Grenoble toujours, tous·tes les ami·es du théâtre et d'ISF, et en particulier Maïwenn, Vitto, Violaine, Vlad ; à Lyon avec les LHPST : Benjamin, Émilien, Éric, Lucie, Pierre, Rémy et puis, ailleurs mais dans mon cœur, Marius, Sarah.
- A mes copaines de la troupe On Enchaîne, évidemment, avec qui je me suis défoulé et ait vécu des moments incroyables toutes ces années. S'il y a un moment de la semaine que j'ai toujours attendu avec impatience, c'est bien le jeudi à 18h30, l'heure de l'impro ! Je chéris votre amitié : Amaury, Anne-Gaëlle (qui décidément est partout), Aurore, Chloé, Clément, Donatien, Emilia, Hamza, Hugo, Jo, Julien, Léna, Léo, Martin, Maude, Marion, Pierre, Solène, Sophie, Suzanne et Tom.
- A ma famille et son soutien indéfectible. Merci Mamie Monique de m'avoir appris à *aller en allant*, j'en ai fait mon cri de guerre. Ton courage et ta persévérance m'ont toujours beaucoup inspiré Mamie. Merci Papi et Mamie de Latour pour votre accueil toujours chaleureux, les promenades au gour, les pompes aux pommes, les matches au stade et les repas de Noël avec Sylvain, Cécile, Candice et Landry. Je me rappelle, petit, d'une visite au moulin Richard de Bas où vous m'aviez dit que vous m'imprimeriez le serment d'Hippocrate si un jour je devenais docteur… avec le recul, je crois qu'il y a eu méprise.
- A Nicolas, à Delphine, et aux marmailles qui vous accompagnent désormais (que leurs âges aient un ou deux chiffres), pour votre capacité à renouveler la langue française par des phrases que seuls vous avez un jour prononcées, pour votre présence continue même lorsque vous êtes loin, pour être mon grand frère et ma grande sœur quoi qu'il arrive.
- A Constance, pour ton oreille toujours attentive, ton pragmatisme à toute épreuve, et pour maintenir avec moi ce lien de ceux qui savent qu'ils pourront toujours compter l'un sur l'autre.
- A ma Maman, toi qui m'as toujours soutenu dans mes choix, qui m'as accompagné partout où me guidait ma quête de faire quelque chose qui me corresponde. Merci d'avoir toujours eu confiance en moi, et de t'être occupée de nous comme tu l'as fait. Merci aussi à Jean-Maurice dont je regrette de ne pouvoir partager que ponctuellement la sagesse et l'esprit taquin.

- A mon Papa qui, bien sûr et il fallait s'y attendre, n'est pas venu à la soutenance. Tu es pardonné. Je me demande ce que tu en aurais pensé, et j'espère quand même que tu aurais été fier.
- Et enfin à mon amoureuse, ma Suzanne… Je sais que tu as commencé la lecture du manuscrit en te ruant pour venir lire cette section. Merci pour le bonheur des moments passés ensemble, et pour le plus grand encore d'imaginer ceux qui arrivent. Je n'ai pas de règle assez longue pour mesurer la chance que j'ai de t'avoir dans ma vie. Alors, c'est vrai, tout n'est pas fait pour être quantifié. Mais rassure-toi, c'est quand même pas mal grand.

Résumé

Intéressées par les innovations récentes dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA), les organisations industrielles cherchent à exploiter leurs potentialités pour améliorer la qualité et la quantité de leur production. Au-delà des récits grandiloquents qui circulent aujourd'hui sur l'objet sociologique protéiforme qu'est l'IA, l'ambition de cette thèse est d'aller investiguer pourquoi et comment, en pratique, les systèmes d'IA sont intégrés aux organisations industrielles. Pour ce faire, elle enquête d'abord sur les motivations socio-économiques des promoteurs de ces technologies, au travers de l'examen des promesses qui portent sur l'IA. Au lieu d'être simplement émises par les promoteurs des technologies et reçues par des adoptants potentiels, ces promesses sont reformulées et réinterprétées par les acteurs des entreprises dans lesquels elles se diffusent, afin de soutenir les projets de changement technologique. Basée sur une étude ethnographique menée entre 2022 et 2024 dans l'industrie du semiconducteur, la thèse décrit ensuite le travail à l'œuvre dans un projet de déploiement d'un système de traitement d'image pour le contrôle qualité. Elle montre comment ces projets mobilisent un important travail des savoirs, entre tâches conceptuelles d'élaboration de catégories et tâches d'annotation plus rébarbatives. Tout au long de ce processus qui s'inscrit sur la durée, les futurs usagers du système sont largement exclus de cette conception. La thèse montre que le dispositif n'est pas nourri des savoirs existants, qui seraient traduits dans la machine : ces savoirs sont reconstruits collectivement à l'occasion du processus de conception. Ils embarquent avec eux une certaine vision de l'organisation du travail de la qualité. Cette recherche cherche enfin à décrire avec finesse le travail au sein de l'univers particulier de la salle blanche dans un contexte d'automatisation déjà poussée, où grande complexité technique se conjugue avec forte incertitude. La thèse montre comment le déploiement de l'IA accompagne la de la prescription du travail. Celle-ci est perçue comme une menace pour les processus d'apprentissage des techniciens, qui tentent de maintenir informellement leur autonomie. Malgré un important dispositif de médiation technologique, l'existence d'un cloisonnement spatial, socio-économique et organisationnel entre salariés des bureaux et de la salle blanche contribue à une méconnaissance du travail d'autrui et à l'impossibilité d'une pleine coopération.

Summary

Interested in recent innovations in the field of artificial intelligence (AI), industrial organizations are seeking to exploit its potential to improve both the quality and quantity of their production. Beyond the spectacular narratives currently circulating about the multifaceted sociological phenomenon that is AI, the aim of this thesis is to investigate why and how, in practice, AI systems are being integrated into industrial organizations. To do so, it first examines the socio-economic motivations of the promoters of these technologies by looking at the promises made about them. Rather than simply being broadcast by the promoters of the technologies and received by potential adopters, the promises of AI are reformulated and reinterpreted by the actors in the companies where they are disseminated in order to support technological change projects. Based on an ethnographic study conducted between 2022 and 2024 in the semiconductor industry, the thesis then describes the work involved in a project to deploy an image processing system for quality control. It shows how these projects mobilize a significant amount of knowledge work, ranging from conceptual tasks of categorization to more tedious annotation tasks. Throughout this long-term process, the future users of the system are largely excluded from its design. The thesis shows that the system is not built on existing knowledge, which would be translated into the machine: this knowledge is instead reconstructed during the design process. It brings with it a certain vision of how the work of quality should be organized. Finally, this research seeks to provide a detailed description of work within the specific environment of the cleanroom, which are already at an advanced stage of automation. In the cleanrooms, great technical complexity is combined with a high degree of uncertainty. The thesis shows how the deployment of AI is part of a growing trend towards work prescription. This is perceived as a threat to the learning processes of technicians, who attempt to maintain their autonomy informally. Despite a significant technological mediation system, the existence of spatial, socio-economic, and organizational barriers between office and cleanroom employees contributes to a lack of understanding of each other's work and make it impossible for them to cooperate.

Liste des figures

Figure 1 : Evolution du nombre d'articles publiés par la presse nationale quotidienne généraliste française entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2024, par an. 19
Figure 2 : Evolution du nombre de salariés dans le secteur secondaire en France de 1970 à 2025 (à gauche), et de 2010 à 2025 (à droite), (INSEE, 2025). 22
Figure 3 : Les arènes normatives de l'IA, schéma adapté de (Benbouzid et al., 2022). 29
Figure 4 : Localisation de l'enquête ethnographique. 44
Figure 5 : Photographie prise par l'auteur (de la thèse, pas du tag !) un matin de mai 2024. 69
Figure 6 : Evolution du rapport entre le nombre de publications relatives au paradigme connexionniste par rapport au paradigme symbolique (échelle logarithmique). Tiré de (Cardon et al., 2018, p. 7). 75
Figure 7 : Exemple de concrétisation schématique du récit des quatre révolutions industrielles. 85
Figure 8 : Le logo du Multidisciplinary Institute of Artificial Intelligence de Grenoble, dont la chaire Ethique & IA coaccueille cette thèse. A gauche, un réseau de neurones est assimilé à l'un des hémisphères du cerveau. 95
Figure 9 : A gauche, une capture d'écran de la vidéo promotionnelle de Google ; à droite, un extrait du billet de blog qui illustre la façon dont les résultats ont réellement été obtenus. 97
Figure 10 : Les quatre promesses de suppression de l'incertitude dans l'Industrie 4.0. 103
Figure 11 : Carte des sites industriels français de production de semiconducteur à la fin des années 2000 (Malier, 2009). La légende originale précise « seuls les emplois directs sont mentionnés, sans intégrer les sous-traitants employés sur site ». 118
Figure 12 : Dénomination des acteurs de la micro-électronique. 120
Figure 13 : Répartition géographique des capacités de production (et seulement production) de semiconducteurs entre 1995 et 2015 (Ericher et al., 2025). 121
Figure 14 : Chaîne d'approvisionnement partielle des micro-processeurs de Nvidia, issu de (Valdivia, 2024). 123
Figure 15 : Affiche d'une série d'événements organisés en mars 2025 par le collectif STopMicro. 124
Figure 16 : Marché des semiconducteurs par domaine d'application, chiffres mesurés en 2021, prédits en 2030 (en milliards d'euros) par Gartner (Ericher et al., 2025). Rappelons (introduction du chapitre I), que les cabinets de conseil tel que McKinsey ou Gartner sont des parties prenantes à part entière dans la mise en valeur des nouvelles technologies numériques. 125
Figure 17 : Contenu promotionnel de l'entreprise Infineon. 127
Figure 18 : L'une des représentations a posteriori de la loi de Moore (Hennessy et Patterson, 2017). Ici, c'est la performance de calcul qui est prise en compte comme variable d'évolution cyclique. 131
Figure 19 : L'équipement standard de la salle blanche, dessin et annotations par l'artiste Zélie (https://zelie.fr/blog/). 137
Figure 20 : Différentes catégories d'objets électroniques selon B. Paulré (1997a). 141
Figure 21 : Un exemple de transistor NPN et sa schématisation, par NitraThor (https://www.nitrathor.fr/fiches/transistor). 144
Figure 22 : Trois circuits intégrés, dans des puces électroniques (image Wikipédia). 145
Figure 23 : Un wafer tenu à la main. Contenu promotionnel de l'entreprise étasunienne Chemours, spécialisée notamment dans la production de fluoropolymères, des fluides qui permettent de protéger les plaques durant leur fabrication. 147
Figure 24 : Un exemple de « plaque bleue » telle qu'un logiciel de visualisation pourrait la présenter (reproduction). 148
Figure 25 : Processus de fabrication des dispositifs à semiconducteur (Clair et Guillot, 2023). 150
Figure 26 : Une salle blanche (photo récupérée sur le site de l'entreprise STMicroelectronics). 153
Figure 27 : Positionnement spatial et organisationnel des équipes côtoyées dans le cadre de l'étude. Les prénoms ont été modifiés, et font référence à des enquêtés mentionnés au fil du texte. 156

Figure 28 : Schématisation de la chaîne d'analyse qualité. 158
Figure 29 : Exemple d'images obtenues en sortie d'inspection. Chaque carré bleu correspond à un défaut. La présence de quelques défauts ponctuels (à gauche) ne constitue pas nécessairement un problème. Lorsqu'ils sont nombreux (au centre) ou regroupés selon des motifs particuliers (à droite), une investigation supplémentaire devient impérative. 159
Figure 30 : Une taxonomie de défauts, tirée de (Graur et al., 2015)., repérables grâce à une revue. Les images sont obtenues grâce à des microscopes électroniques à balayage. On peut imaginer que chacun d'eux puisse représenter un carré bleu sur une image d'inspection. 159
Figure 31 : Schématisation de la chaîne d'analyse qualité après introduction du ClassifiMotif (modification en rouge par rapport à la schématisation précédente). 167
Figure 32 : Le conflit de rationalité, par S. Borel, Y. Ferguson et J. Condé (2024b). 170
Figure 33 : Principe de fonctionnement du CatégoDéfo. L'image est convertie en un tableau de nombres qui sont fournis en entrée d'un réseau de neurones artificiels. Après traitement, le modèle fournit un nombre, qui put être interprété à partir d'un index de défauts réalisé par les concepteurs. L'image de défaut est tirée de (Graur et al., 2015) et le réseau de neurones provient de la page « Réseaux de neurones artificiels » de Wikipédia. 173
Figure 34 : Modèle d'adoption des technologies par Rogers ([1962] 1995). La courbe bleue représente le nombre d'adoptions actuel en fonction du temps, tandis que la courbe jaune représente la somme des adoptants en fonction du temps. 187
Figure 35 : Trajectoire temporelle des technologies avec, sur les côtés, les champs de recherche qui méritent un approfondissement et, au milieu, les courants qui travaillent déjà sur les phases de conception et d'usage, respectivement. Tiré de (Bailey et Barley, 2020). 213
Figure 36 : Avant / après le déploiement idéal du ClassifiMotif. 219
Figure 37 : Variation temporelle dans les logiques d'intégration des technologies. 220
Figure 38 : Cadre théorique de la réunion « Priorités et automatisation » du point de vue de ses participants. 222
Figure 39 : Extrait d'une présentation d'une startup qui conçoit des dispositifs de maintenance prédictive à partir de données de capteurs issues de machines. Les données y sont valorisées comme « de l'or ». 225
Figure 40 : Structure et informations présentes dans un fichier KLARF. Le schéma est une synthèse d'un tutoriel présenté par la société Artwork (https://artwork.com/package/wmapconvert/map_formats/KLARF/index.htm). 226
Figure 41 : Modèle CRISP-DM (Martinez-Plummed et al., 2021) 237
Figure 42 : Modèle de conception de système d'IA, adapté de CRISP-DM (Haakman et al., 2021). 238
Figure 43 : Différents modèles de la conception de base de données présents dans la littérature. 240
Figure 44 : Arc de travail de l'IA (Girard-Chanudet, 2023b). 241
Figure 45 : Modèle de répartition du travail des bases de données. 244
Figure 46 : Illustration schématique de la catégorisation. 246
Figure 47 : Illustration schématique de l'annotation. 247
Figure 48 : Capture d'écran du site https://www.edencore.ai/shop/, où il est par exemple possible d'acheter un lot d'images annotées d'abricotiers atteints de la sharka. 248
Figure 49 : Illustration schématique simplifiée du peuplement. 249
Figure 50 : Page de garde de l'herbier présentant les motifs et leurs codes (reproduction, les motifs ne sont pas exhaustifs et les noms ont été changés). 252
Figure 51 : Page « Cercle » de l'herbier (reproduction altérée). 253
Figure 52 : Comparaison entre les approches descriptive et causale dans le processus de catégorisation, et leurs significations pour la représentation de l'organisation du travail. 255
Figure 53 : A gauche, une tache bien délimitée, à droite, une tache qui ne l'est pas, le motif n'est pas pleinement circulaire. 261

Figure 54 : Interface logicielle de visualisation des plaques (reproduction altérée). Il faut imaginer que le tableau comporte cinquante lignes de même nature (non reproduites ici) plutôt qu'une..... 262
Figure 55 : Des exemples de spirales, avec des sens de rotation opposés : l'une est une spirale gauche, l'autre est une spirale droite. L'objectif de la réunion est de s'accorder sur laquelle est laquelle. 269
Figure 56 : Schéma d'explicitation de la méthode convexe-concave de Jérôme pour différencier les spirales. A gauche le bord est concave (arrondi vers l'intérieur) par rapport à l'axe des abscisses : c'est une spirale gauche. A droite, le bord est convexe (arrondi vers l'extérieur) : c'est une spirale droite. . 270
Figure 57 : Le creux de la main gauche épouse un bras de spirale sur le volet supérieur de la plaque : selon la définition que nous avons proposée, c'est donc une spirale gauche. Nous remercions vivement Anne-Gaëlle Guérin et Suzanne Guillou pour leur assistance technique dans la réalisation de ce cliché. 274
Figure 58 : Schéma explicatif du « mode shadow »..... 283
Figure 59 : Des matrices de confusion. A gauche, le cas général, et à droite, avec un exemple ad hoc d'un système de classification des pourriels (spams). Les graphiques proviennent de la page Wikipédia pour « Matrice de confusion »..... 284
Figure 60 : Illustration graphique de la précision et du rappel. Le F1-score est calculé en faisant la moyenne géométrique de ces deux nombres. L'illustration ne représente que le cas binaire (deux classes), il existe différentes méthodes pour traiter le cas multi-classes. (c) Wikimedia Commons..... 285
Figure 61 : Exemple de traitement par les huit modèles votants. Sept modèles sur huit indiquent « tache ». Si le seuil de définition est inférieur ou égal à 7/8, alors le ClassifiMotif indiquera qu'une tache est présente. S'il est fixé à 8/8, en revanche, il indiquera que le résultat est « motif indéfini ». 287
Figure 62 : Poster réalisé par le graphiste MadPanda, qui écrit en description : « C'est un super design si vous aimez l'apprentissage machine, l'intelligence artificielle, l'apprentissage profond ou la science des données » (notre traduction). 290
Figure 63 : Deux plaques portant des motifs ambigus. A gauche, il y a à la fois un disque et une tache. A droite, il pourrait s'agir d'un disque comme d'une tache. 296
Figure 64 : Potentielles transformations organisationnelles dans le déploiement de nouvelles technologies..... 306
Figure 65 : Schéma de l'alcôve des techniciens qualité, vue du dessus. Elle donne sur la passerelle entre deux bâtiments. Il n'y a pas de porte..... 314
Figure 66 : Rôles et prénoms (modifié) des enquêtés rencontrés..... 315
Figure 67 : Recto d'une fiche-expert (idéal-type). 330
Figure 68 : Verso d'une fiche-expert (idéal-type). 331
Figure 69 : La stratégie d'adhésion des salariés menée par le management peut se traduire aussi bien selon une stratégie d'acceptation qu'une stratégie d'acceptabilité. Nous suggérons que les cloisonnements existants entre concepteurs et utilisateurs sont à l'origine d'une orientation préférentielle vers la seconde..... 347
Figure 70 : Formulaire de consentement à l'enregistrement des entretiens..... 408

Liste des tableaux

Tableau 1 : Approches socio-constructivistes dans le déploiement des nouvelles technologies par les organisations. Traduit de (Leonardi et Barley, 2010). 39
Tableau 2 : Repères des développements des cadrages théoriques au fil de la thèse. 41
Tableau 3 : Récapitulatif des méthodes employées. 48
Tableau 4 : Récapitulatif du plan de la thèse. 59
Tableau 5 : Promesses relatives à l'IA dans l'industrie. 115
Tableau 6 : Comparaison synthétique de notre étude avec celle de N. Avnoon (2021) sur le plan de la temporalité de l'acquisition de l'expertise technique. 229
Tableau 7 : Sélection de travaux traitant de la constitution de bases de données pour des systèmes d'IA 245
Tableau 8 : Approches de constitution des bases de données des ClassifiMotif à SemiCorp. 265
Tableau 9 : Hypothèses des pratiques d'évaluation des dispositifs d'apprentissage machine, relevées par (Hutchinson et al., 2022). 280
Tableau 10 : Performances mesurées et espérées du ClassifiMotif, évaluation de décembre 2022. .. 286
Tableau 11 : Evolution du statut des hypothèses des pratiques d'évaluation des dispositifs d'apprentissage machine, relevées par (Hutchinson et al., 2022). 301
Tableau 12 : Stratégies mises en place par le service Qualité pour favoriser l'adhésion du ClassifiMotif. 346
Tableau 13 : Synthèse des effets de l'intégration de l'IA générative à partir d'une revue de (Barcellini et al., 2024). 355
Tableau 14 : Résumé chronologique du déroulé de l'enquête. 403
Tableau 15 : Réunions quotidiennes. 404
Tableau 16 : Réunions techniques, de présentation ou d'échange. 405
Tableau 17 : Sessions d'échanges avec les enquêtés (discussions libres, observation active du travail ; réunions exclues). 406
Tableau 18 : Temps de travail en autonomie. 406
Tableau 19 : Résumé des entretiens réalisés à Mecanex. 407
Tableau 20 : Guide d'entretien à Mecanex 410

Glossaire

Algorithme. Suite d'instructions déterministes (logiques ou calculatoires) visant à produire un résultat à partir d'une entrée.

Algorithme d'apprentissage. Algorithme qui permet d'entraîner un modèle (réseau de neurones par exemple) à réaliser des tâches (décision, prédiction, génération) à partir de données ou de règles formelles.

Base de données. Ensemble structuré de données (variables numériques, chaînes de caractères et / ou images) réunies dans un même espace, et décrites de façon systématique, souvent sur la base de caractéristiques (*features*) et / ou de catégories.

CatégoDéfo. Système de classification automatisée des défauts à partir d'images de défauts issues de microscopies électroniques à balayage. Il repose sur un réseau de neurones et une base de données dédiée.

ClassifiMotif. Système de classification automatisée des motifs à partir d'images binarisées de plaques *(*1 pour un défaut, 0 sinon). Il repose sur un réseau de neurones et une base de données dédiée.

***Dataset*.** Voir Base de données.

Défaut (dans l'industrie du semiconducteur). Ecart local à la norme sur une plaque, résultant d'une défaillance dans le processus de fabrication ou simplement de la forte incertitude inhérente à un contexte opérationnel de très haute précision. Un défaut isolé pose problème pour la ou les quelques puces concernées, mais n'est pas nécessairement un problème pour l'ensemble de la plaque, compte tenu du nombre de puces présentes sur chacune d'elles.

Dopage. Etape du processus de fabrication des matériaux semiconducteurs lors de laquelle des impuretés sont introduites dans le matériau pour modifier ses propriétés de conduction.

Gravure. Etape du processus de fabrication des dispositifs à semiconducteurs lors de laquelle, par des procédés chimiques (bain dans une solution) ou physiques (envoi d'un faisceau de particules), certaines couches de matériau semiconducteurs sont retirées. Des dépôts pourront ensuite y être effectués.

***Hold* (**un lot / une plaque). Retenir un lot / une plaque dans le service qualité lorsqu'il est trop défectueux, dans le but de l'analyser.

Intelligence artificielle (IA). Discipline scientifique visant à produire des systèmes capables de réaliser des tâches cognitives complexes. Par extension, dispositifs relevant de cette discipline. Pour plus de détails, voir la section de l'introduction dédiée à la définition du terme.

Lot. Un ensemble de plaques circulant dans les ateliers de fabrication ou de contrôle qualité. Toutes subissent en général les mêmes opérations de fabrication, mais le contrôle qualité est souvent réalisé sur un échantillon du lot.

Motif (dans l'industrie du semiconducteur). Disposition spécifique des défauts sur une plaque de sorte à former des agencements particuliers et reconnaissables (par exemple : un cercle, un trait, ou d'autres formes plus complexes). Un motif peut être un indicateur de problèmes particulier dans le processus de fabrication.

Photolithographie. Etape du processus de fabrication des dispositifs à semiconducteurs lors de laquelle un masque est transféré sur une plaque grâce à des rayonnements. Ce masque vise à protéger certaines zones de la plaque. Les autres, non protégées, pourront être gravées par la suite.

Plaque. Disque de matériau semiconducteur dopé sur lequel sont déposés et gravés des métaux suivant des motifs précis. A la fin du processus de fabrication, une plaque comporte de nombreuses puces électroniques (des centaines à des milliers selon les cas) qui sont découpées et encapsulées pour être intégrées dans des dispositifs électroniques plus larges.

Réseaux de neurones. Technique d'IA reposant sur l'interconnexion d'un grand nombre d'unités de calcul (les neurones). Ce type de modèle est entraîné grâce à un algorithme d'apprentissage.

Salle blanche. Environnement industriel où sont (notamment) fabriqués les dispositifs à semiconducteur. Cet espace est fortement contrôlé : température, pression, humidité y sont mesurés et ajustés, tandis qu'un protocole très strict précède l'entrée de celles et ceux qui y pénètrent.

Semiconducteur. Matériau ayant des propriétés de conduction électrique intermédiaire entre un matériau isolant et un matériau conducteur. L'industrie du semiconducteur (on dira aussi industrie de la micro-électronique) vise par extension à concevoir et manufacturer des dispositifs à semiconducteurs afin de fabriquer des équipements de calcul, de stockage ou de transmission (de l'énergie ou de l'information).

Wafer. Voir Plaque.

Introduction

C'est un duel au sommet qui se joue à Paris en février 2025. Ou plutôt un duel des sommets.

D'un côté, le Grand Palais, dont la verrière vert réséda fait depuis peu le bonheur des visiteurs après de longues années de travaux. Des participants d'une centaine de pays sont réunis à l'invitation des gouvernements français et indiens, à l'occasion du « Sommet pour l'action sur l'intelligence artificielle ». Sur la grande scène, les tables rondes se succèdent autour de thèmes tels que la gouvernance de l'intelligence artificielle (IA), la cybersécurité, l'innovation, l'intérêt général. Ministres, PDG et scientifiques prennent la parole à tour de rôle. Les amateurs de grandes annonces ne sont pas en reste, car les chiffres donnent le tournis. 109 milliards d'euros d'investissements privés sont annoncés pour la construction des centres de données (*data centers*) en France, 200 milliards d'investissements publics et privés en Europe pour accompagner les « champions de l'IA » (startups et grandes entreprises) dans le cadre du programme *Invest AI* (Sommet pour l'action sur l'IA 2025). L'heure est à la ruée vers l'IA. L'accélération de ces investissements, comme le précise le président Emmanuel Macron en clôture du sommet, s'accompagne d'une volonté d'accélérer le déploiement des applications de l'IA. L'horizon apparaît enthousiasmant : « Nous sommes au fond convaincus que l'intelligence artificielle va nous permettre de mieux apprendre, de mieux nous soigner, de mieux travailler, de mieux vivre au fond, dans nos sociétés » (Macron 2025).

De l'autre côté, le Théâtre de la Concorde, dont c'est le nom qui a été rénové l'année passée. L'ancien espace Cardin se veut, selon la ville de Paris, être un lieu de débat où art et expression démocratique se mêlent. L'ambiance est un peu moins guindée, mais la salle est tout aussi pleine. Sur la scène, Éric Sadin, philosophe et essayiste critique des technologies, et Éric Barbier, journaliste et délégué syndical à l'*Est Républicain*, animent ce qu'ils ont appelé le « Contre-sommet de l'IA ». Le format présente des similarités avec la scène principale du Sommet, même si les marques de préoccupation semblent se substituer aux récits d'espoir. L'objectif annoncé par les organisateurs est de « montrer l'envers du décor ». Par petits groupes, les intervenants témoignent et dialoguent sur des thèmes tels que l'IA et l'éducation, l'IA et l'environnement, l'IA et la voix ou l'image dans les métiers culturels. On compte parmi les participants des syndicalistes, des chercheurs, des membres d'associations professionnelles confrontés aux transformations (potentielles ou en cours) de leurs métiers. Le constat est diamétralement opposé à celui qui s'ébauche quelques rues plus loin au Grand Palais. Les panels dénoncent la dégradation des conditions de travail et d'apprentissage, mais aussi les atteintes aux droits fondamentaux au cours de la fabrication et de l'usage des systèmes d'IA.

Les deux sommets ont des tonalités antagonistes, c'est le moins que l'on puisse dire. Ce qui est en jeu à Paris, ce n'est pas seulement une somme d'intérêts pour l'IA comme technologie, entre risques et opportunités. Ce stade a vraisemblablement été dépassé. Les annonces et les débats portent sur un déploiement massif de systèmes d'IA, dans l'ensemble des sphères de la société. Ce programme est perçu, de part et d'autre, comme un enjeu majeur.

Notre ambition, dans cette thèse, sera de nous nicher dans un espace très spécifique de l'étendue vaste des secteurs concernés – ou amenés à être concernés, ou promis à être concernés – par le déploiement de l'IA. C'est depuis ce petit espace que nous tâcherons d'ouvrir des réflexions et de tirer des conclusions

plus générales sur les technologies du numérique, leur intégration dans les organisations, le travail tel qu'il est perçu et tel qu'il se fait. L'IA, en cela, sera un prétexte pour analyser la transformation des organisations et du travail.

1. Des éléments de contexte

1.a. Explosion médiatique

Régulièrement, en marchant dans la rue, je surprends des bribes de discussions plutôt univoques : « Tu le feras faire par une IA… », « ChatGPT m'a dit… ». J'ai parfois l'impression de ne pas pouvoir écouter la radio sans faire de la veille médiatique à mon insu. Lorsqu'il y a des inconnus à une soirée, le sujet de l'IA est systématiquement au menu. L'avantage d'un sujet d'actualité, c'est qu'il suscite une profusion de discours qu'il est alors possible d'analyser. C'est aussi, précisément, son inconvénient ; mais il serait malvenu d'introduire ce travail en me plaignant.

Un an tout pile après le début de la thèse, en novembre 2022, la mise à disposition de l'agent conversationnel ChatGPT a provoqué un regain d'intérêt médiatique important pour l'IA, voir (Figure 1). Le nombre d'articles qui traitent de l'IA a nettement augmenté autour des années 2015-2016 avant d'exploser en 2023. Le phénomène est habituel pour ce terme d'*IA*. De promesses en désillusions, de désillusions en succès techniques ou commerciaux, et vice et versa, l'histoire de l'IA a été marquée par des « hivers » et des « étés » qui se succèdent cycliquement (Cardon, Cointet, et Mazières 2018).

La rupture n'a pas tant porté sur la technologie en elle-même. Le papier fondateur de l'architecture *Transformer*, qui est à la base de la majorité des larges modèles de langage (LLM) a été publié par A.

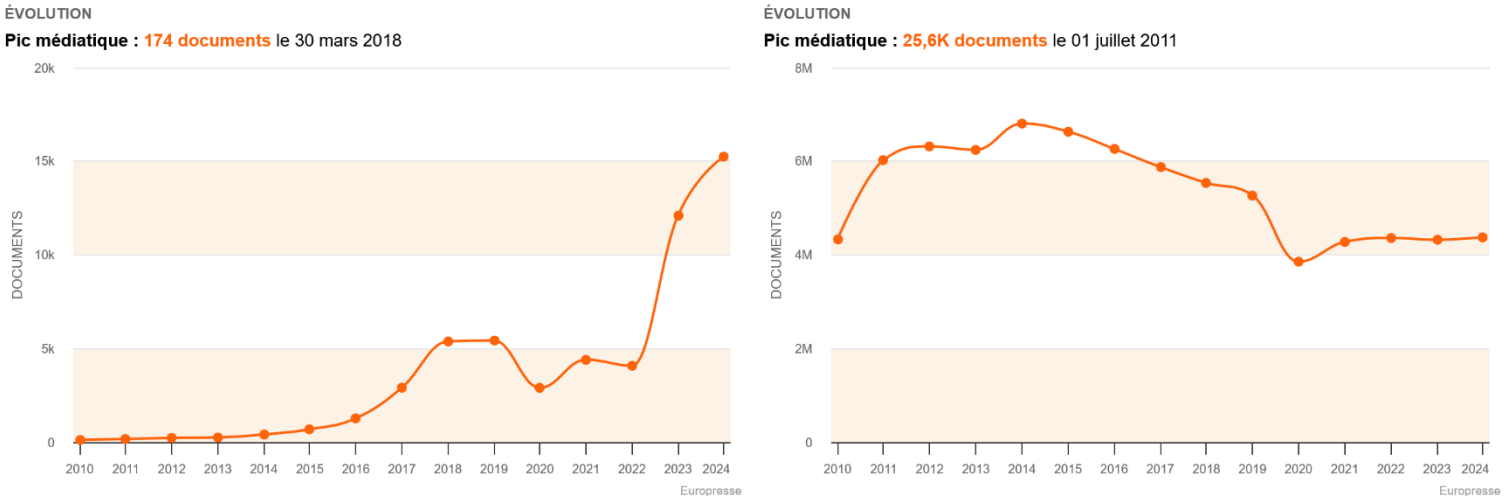


Figure 1 : Evolution du nombre d'articles publiés par la presse nationale quotidienne généraliste française entre le 1er janvier 2010 et le 31 décembre 2024, par an.
A gauche, les articles qui comportent les termes « intelligence artificielle ».
A droite, pour référence, l'ensemble des articles publiés.
Graphiques issus de la base Europresse. L'interpolation entre les points peut être ignorée.

Vaswari et son équipe (2017), lors de la conférence NIPS[1]. Ce n'est pas non plus, comme on a pu le lire, un bouleversement en termes d'accessibilité. Des modèles de langage étaient déjà disponibles au grand public bien avant 2022, et le modèle GPT-3 lui-même était déjà ouvert aux utilisateurs en 2020. Le véritable changement, il nous semble, réside précisément dans la combinaison de ces facteurs avec une couverture médiatique massive. Elle témoigne d'une campagne de promotion publique exceptionnelle pour une technologie (Bourne 2024).

La Figure 1 présente un point tout particulièrement intéressant : malgré la forte croissance du nombre d'articles publiés à partir de 2023, le pic médiatique est atteint en mars 2018[2]. Que s'est-il passé ? Cette date correspond en fait à la publication du rapport piloté par le mathématicien et député C. Villani (2018), à la suite d'une mission dont les travaux ont débuté dès 2017, suite à l'élection du président Macron. Ce rapport vise à orienter la stratégie française dans le domaine de l'IA, prise comme un sujet d'action publique à part entière. L'IA est dès lors perçue comme un « enjeu primordial de la compétition internationale technologique, économique, voire géopolitique » (Kirtchik et Musiani 2025:105). L'ambition affichée est grande : il s'agit pour la France de se positionner comme un acteur mondial majeur du domaine. Les gains attendus sont nombreux, surtout sur le plan économique. Ce que cible explicitement le gouvernement français, c'est la recherche de « compétitivité » et de « productivité » (Gouvernement français 2021:6). La génération (plus ou moins) automatisée de prédictions, de décisions, de langage ou encore de contenu audiovisuel démultiplie les possibles applications de l'IA, pressenties pour imprégner de larges pans de la vie personnelle tout comme de la vie professionnelle.

1.b. L'IA comme instrument stratégique de la politique industrielle française

Amorcée en 2018 dans la foulée du rapport de C. Villani et ses équipes, la stratégie nationale en IA (SNIA) s'étend aujourd'hui sur trois phases (2018 – 2022, 2021 – 2025, 2025 – 2030). La dernière a été lancée officiellement lors du Sommet pour l'action sur l'IA. Les capacités de formation et de recherche ont été investies de façon prioritaire, notamment au travers de la création du réseau de recherche et de formation 3IA[3], qui s'est prolongé dans les clusters IA. Lors du Sommet, c'est le développement de l'infrastructure technique qui a fait l'objet d'une grande attention. Il est également prévu d'accélérer le déploiement de l'IA dans les services publics (Gouvernement français 2025a).

L'industrie est un autre des secteurs prioritaires de la SNIA. Le tissu industriel est vu à la fois comme un acteur de la fabrication de l'IA, et comme le réceptacle de nouvelles applications basées sur ces technologies (Gouvernement français 2021). Dans la partition proposée par la SNIA, chacun a à jouer son rôle. La stratégie vise à financer et à mettre en avant des startups dont l'IA sera le cœur de métier. Largement médiatisée, l'entreprise française Mistral AI est emblématique de cette posture stratégique. L'Etat cherche en ce sens à accompagner le développement de tels acteurs par des aides économiques à l'innovation nombreuses (Gouvernement français 2021). La commande publique est notamment

[1] « Tétons » en anglais. Le nom a été changé l'année suivante en NeurIPS suite à une controverse contestant le caractère sexiste de cet acronyme, dans un univers professionnel encore très masculin (Shead 2018).

[2] Il a, depuis, à nouveau été atteint lors du sommet de février 2025.

[3] Institut Interdisciplinaire en Intelligence Artificielle. Il y en a quatre entre 2021 et 2024 : Pr[AI]rie à Paris, ANITI à Toulouse, 3IA Côte d'Azur à Nice, et MIAI à Grenoble.

envisagée comme un moyen de soutenir les acteurs de l'IA (Gouvernement français 2025a). Les petites et moyennes entreprises, qui bénéficient de financements particuliers, sont aussi encouragées à opérer une transformation numérique par l'intégration croissante de nouvelles technologies (Gouvernement français 2021). Les plus grandes firmes industrielles, de leur côté, sont invitées à participer à des projets de plus vaste ampleur. Le programme *Confiance.ai*, par exemple, a permis le développement d'une plateforme logicielle pour faciliter le déploiement de l'IA dans l'industrie. Des projets d'innovation européens, comme StorAIge qui finance cette thèse, s'attaquent quant à eux à la conception des dispositifs technologiques nécessaires pour soutenir ces développements : puces électroniques, logiciels, centre de données.

Les directives nationales ont ensuite été incarnées par le slogan « Osez l'IA » porté par Clara Chappaz, ministre déléguée chargée de l'Intelligence artificielle et du Numérique. En juillet 2025, un plan éponyme a été lancé dans le but de diffuser massivement les technologies d'IA dans les entreprises françaises (Gouvernement français 2025b). Il repose sur un triptyque Sensibilisation – Formation – Accompagnement, qui se déclinerait suivant de nombreux services accordés aux entreprises : diagnostics de cas d'usage en interne, mise à disposition d'un catalogue de solutions techniques conçues par des startups, financement de projets par des prêts. Le chiffre de 15 millions de salariés formés à ces thématiques à l'horizon 2030 a été avancé par le gouvernement.

La stratégie française s'ancre dans un récit historique grandiloquent. Dans le discours du gouvernement français – comme ailleurs – ce qui se joue n'est rien de moins que l'avènement d'une quatrième révolution industrielle, ou *Industrie 4.0* (Gouvernement français 2021). Façons de produire, de travailler, d'apprendre seraient en passe d'être bouleversées par l'interconnexion croissante des systèmes de production et de communication. L'industrie serait en cours de basculement vers une ère du tout numérique.

Dans ce contexte vertigineux, un secteur industriel en particulier s'est trouvé sous le feu des projecteurs. En plus de l'IA, la stratégie industrielle de la France mobilise en effet ses efforts en faveur de l'industrie du semiconducteur, ou industrie de la micro-électronique. Ce secteur largement méconnu du grand public produit pourtant les puces et composants électroniques qui s'intègrent dans n'importe quel objet électronique du quotidien. En plus d'être un vecteur de l'électrification des véhicules, l'industrie de la micro-électronique joue un rôle majeur dans le déploiement de l'IA et plus largement du numérique (Gouvernement français 2022). Face à la compétition féroce que se jouent les Etats-Unis et les pays d'Asie du Sud-Est, les ambitions du gouvernement français ne sont pas aussi hautes que dans le secteur de l'IA. L'objectif annoncé, plus modeste, est de retrouver une forme d'agentivité et d'autonomie dans le contrôle de la chaîne de valeur du semiconducteur. Il n'est ainsi pas étonnant de retrouver des acteurs de la micro-électronique dans les projets d'innovation que nous citions précédemment.

1.c. Entre enjeux économiques et enjeux du travail et de son organisation

Les échos inquiets du Contre-sommet constituent une réaction directe à l'enclenchement de ces grands mouvements stratégiques. Ils viennent questionner l'apparente évidence d'une promotion collective de l'IA en pointant du doigt ses conséquences sur la vie sociale, et en particulier sur le travail. De tels débats sont légitimes. Sur la thématique de l'emploi, des études largement relayées ont pu alerter sur la possibilité d'une vaste automatisation du travail (Arntz, Gregory, et Zierahn 2016; Frey et Osborne [2013]

2017). Ces analyses ont fait date dans le traitement médiatique de ces sujets, même si leur nature prédictive se voit aujourd'hui confrontée à la réalité de l'accoutumance progressive des organisations aux technologies numériques. D'autres études ont montré un phénomène de polarisation des emplois dans le déploiement de technologies numériques, avec de plus en plus d'emplois très qualifiés et surtout peu qualifiés (Autor et Dorn 2013). Il apparaît incertain que ce processus se prolonge indéfiniment (Autor 2015). Avec D. Autor, la réflexion s'axe non plus sur la quantité de travail (l'emploi) mais plutôt sur sa qualité, entre maintien des compétences et qualité de service.

Les interventions du Contre-sommet, en écho avec la sociologie du travail, nous invitent à aller plus loin : quelles évolutions des conditions de travail, du sens au travail, de l'épanouissement dans sa réalisation ? De telles questions demandent à réfléchir au fonctionnement des organisations, puisque la transformation numérique est aussi une transformation du travail et de son organisation. Utiliser de l'IA dans le travail signifie travailler différemment. Au-delà des attentes en termes de compétitivité ou de productivité, les entreprises aux prises avec ces nouvelles technologies font face à un certain nombre de défis lorsqu'elles tâchent de les intégrer et les adapter... à moins que ce ne soient les organisations elles-mêmes qui s'adaptent. Le secteur de l'industrie apparaît tout particulièrement indiqué pour observer ces transformations.

1.d. Transformations numériques des organisations industrielles

En dépit d'une chute importante du nombre de salariés depuis les années 1970 et d'une croissance mise à mal pendant la pandémie de Covid-2019, le nombre d'emplois industriels paraît se stabiliser depuis une dizaine d'années autour d'un peu plus de trois millions (INSEE 2025). Même s'il est judicieux de rester prudents dans nos interprétations, il semble malgré tout que la nouvelle vague d'automatisation annoncée ne se montre pas significative à écarter les salariés de l'emploi industriel en valeur absolue.

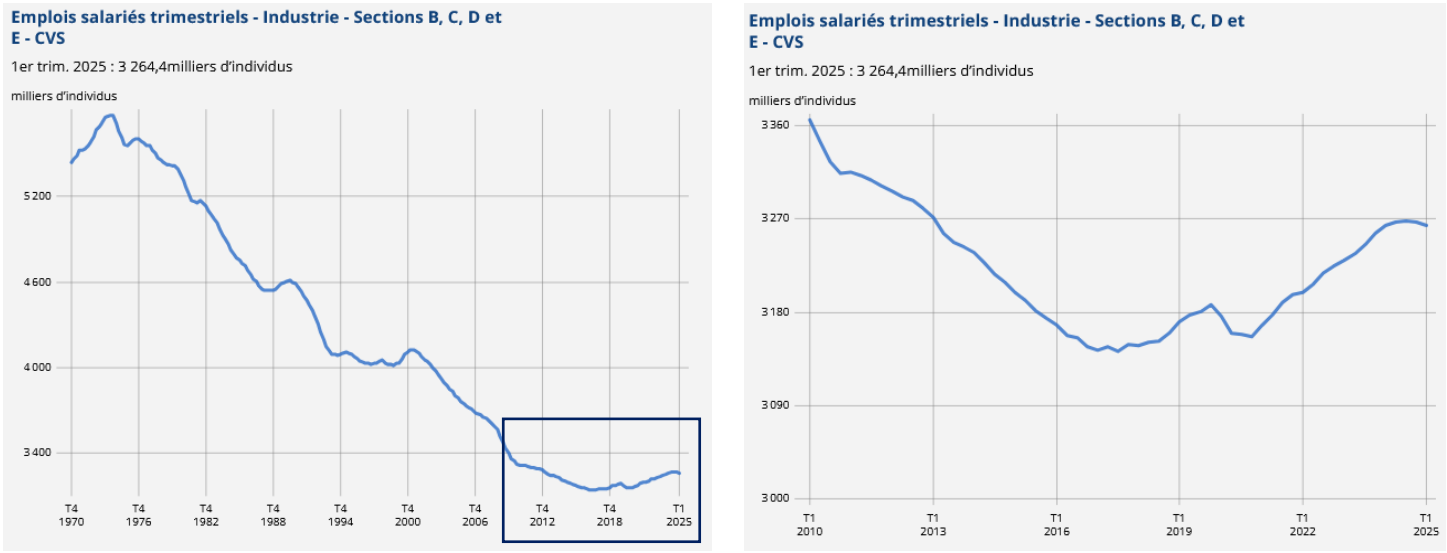


Figure 2 : Evolution du nombre de salariés dans le secteur secondaire en France de 1970 à 2025 (à gauche), et de 2010 à 2025 (à droite), (INSEE, 2025).

L'industrie est depuis longtemps un terrain privilégié des sociologues. Ils ont pu y observer les mouvements de mécanisation (Ginzberg 1982), de numérisation (Benedetto-Meyer et Boboc 2021), et

désormais d'automatisation des procédés industriels. Dans les années 2010, le discours de l'*Industrie 4.0* a tout particulièrement été le vecteur de ce projet d'intégration généralisée de nouvelles technologies (Kohler et Weisz 2018). Malgré l'apparente nouveauté de ces récits, la recherche d'une standardisation du travail et d'un accroissement de son contrôle ont en réalité parcouru les décennies (Segrestin, Darréon, et Trompette 2004), en constituant un objectif fixe des organisations industrielles. Les dynamiques d'automatisation, plutôt que de substituer certaines tâches en laissant aux salariés ce qui relèverait d'un « savoir-faire ouvrier », ont contribué à transformer en profondeur les activités de travail en introduisant de nouvelles formes de mesure, de contrôle, de commande (de Terssac et Coriat 1984). Si l'intégration de nouvelles technologies peut amener à une diminution de la demande en main d'œuvre, d'autres phénomènes sont à l'œuvre : intensification du rythme du travail, augmentation des risques psychosociaux et des efforts physiques, baisse du sentiment de reconnaissance, charge toujours importante pesant sur les femmes entre activités professionnelles et domestiques, contrôle accru du travail (Méda 2022).

Les vagues de transformation de l'industrie ne sont cependant ni immédiates ni complètes. Elles demandent un travail collectif et la contribution des salariés qui sont amenés à changer, plus ou moins radicalement, leur façon de travailler. Des modèles gestionnaires promouvant l'horizontalité des relations de production et l'autonomie des salariés ont émergé au cours des années 2000 et 2010 (Ughetto 2018b). Ils ont encouragé la mise en place de dispositifs de gestion de projets en interne pour inclure les salariés dans des processus d'amélioration continue de l'entreprise et plus largement pour renforcer leur prise d'initiative. P. Ughetto (2018b:140-41) se montre dubitatif : à quel point les propositions et débats auxquels contribuent les salariés, parfois à l'encontre de leur hiérarchie, font-ils l'objet d'une réelle prise en compte ? D. Méda (2022:70) note que la littérature est encore divisée sur la qualification des nouveaux modes d'organisation du travail. Trois hypothèses prédominent : (1) accomplissement réussi d'une participation collective au travail, (2) poursuite d'un taylorisme assisté par ordinateur – J. S. Carbonell (2025) parle de « taylorisme augmenté » – et (3) reconfiguration limitée des logiques tayloriennes, entre gain faible en polyvalence et prédominance d'une hiérarchisation forte dans les projets de changement technologique.

Les entreprises ne s'engagent pas toutes au même rythme dans ces projets. Le coût à l'entrée, la spécificité des besoins ou encore le manque de compétences en interne compliquent les démarches des petites et moyennes entreprises. En outre, certaines tâches restent encore hors de portée de l'automatisation, et les repérer n'est pas si évident. Même au sein des firmes les plus pénétrées par les nouvelles technologies, la généralisation du modèle de fabrication dans le noir (*lights out manufacturing*) n'est vraisemblablement pas à l'ordre du jour. La qualité du travail réalisé reste dépendante de l'activité de salariés. Il subsiste ainsi dans le travail des espaces de liberté, parfois minces, dans lesquels peut s'exprimer leur capacité d'adaptation. Des questions générales méritent alors d'être posées sur les effets et modalités de l'intégration de l'IA dans les espaces de travail : comment le déploiement de l'IA dans les organisations industrielles altère-t-il l'expérience du travail ? et qui y contribue ? de quelle façon ? Nous tâcherons d'affiner ce questionnement en parcourant la littérature. Pour ce faire, il nous faudra d'abord en passer par quelques prérequis définitionnels.

2. Se saisir de l'IA, se plonger dans l'industrie : dire les termes du sujet

2.a. Définition scientifique de l'IA, introduction aux techniques de l'IA

« Définir l'intelligence artificielle n'est pas chose facile. » Voilà comment débute le rapport de C. Villani (2018:9) et bon nombre des travaux qui évoquent le sujet. Le caractère élusif de l'expression amène les chercheurs en sciences computationnelles à se montrer normatifs, en déployant leurs efforts pour définir ce qui relève ou non d'applications de l'IA.

Dans l'introduction de leur livre *AI Snake Oil*, A. Narayanan et S. Kapoor (2024) proposent une drôle d'expérience de pensée. Ils imaginent un univers parallèle où bicyclette, avion et paquebot sont réduits à des « *véhicules* » (*transports*) permettant de se rendre d'un point à un autre. Dans ce monde imaginaire, on ne parle jamais de bicyclette, d'avion, ou de paquebot, mais toujours de *véhicule*. Alors que des navettes spatiales de dernière génération sont fabriquées, plus rapides que jamais, l'on annonce que les *véhicules* vont de plus en plus vite. Les automobilistes se trouvent alors étonnés lorsque leur garagiste leur annonce que non, il ne sera pas possible d'aller plus vite avec leur propre *véhicule*. Les créateurs imaginent en outre la prolifération d'arnaques en tout genre, basées sur ces quiproquos. Voilà exactement, expliquent-ils, ce qu'il se passe aujourd'hui avec l'IA, expression protéiforme et malléable dont l'usage indistinct contribue à la confusion générale. Dans la même veine, en référence aux travaux de Claude Lévi-Strauss, la sociologue L. Suchman (2023) suggère que l'IA est un « signifiant flottant ». Le flou autour de l'IA serait entretenu stratégiquement par ses promoteurs. Un brin provocateur, l'informaticien L. Julia (2019) s'est quant à lui fait connaître du grand public en expliquant que l'IA, ça n'existe pas. L'assertion ne révèle pas tant un débat sur l'ontologie de l'IA, que sur la correspondance entre ce que peuvent faire les systèmes d'IA, et ce qui peut être attendu d'eux (Vayre et Gaglio 2021). L'ensemble des attentes qui ont été construites autour de ces systèmes contribue à brouiller leurs véritables capacités et incapacités. Cela étant dit, et nous rejoignons pleinement J.-S. Vayre et G. Gaglio (2021) sur ce point, l'IA, même comme construction médiatique, reste un objet de discours et mérite à ce titre que la sociologie s'en saisisse.

Une fois la difficulté reconnue, retroussons-nous les manches pour nous atteler à proposer quelques éléments de définition. Définir l'IA, c'est aussi expliquer l'IA. Il faudra donc en passer par de brefs détours à visée pédagogique que le lecteur avisé pourra volontiers s'épargner.

IA, les premiers pas

Le terme d'intelligence artificielle est relativement récent. En 1956, à Dartmouth, de jeunes chercheurs étasuniens se retrouvent lors d'une école d'été. Parmi eux, plusieurs entreront dans la postérité pour leurs contributions au traitement du signal (Claude Shannon), à la psychologie cognitive et à l'économie (Herbert Simon), et bien sûr à l'IA (Marvin Minsky, et le professeur qui les a réunis, John McCarthy). L'année passée, les organisateurs ont rédigé une proposition qu'ils ont soumise à leur université et dans laquelle ils présentent leur projet d'école d'été (McCarthy et al. [1955] 2006). Leur but est simple : obtenir un financement pour garantir le bon déroulé des semaines d'ateliers. L'invention du

terme « d'intelligence artificielle », attribuée à John McCarthy (Moor 2006), s'inscrit ainsi dans un contexte scientifique, certes, mais aussi promotionnel. Il s'agissait pour des chercheurs de convaincre leur université de leur fournir de l'argent, et d'adopter, pour ce faire, un lexique convaincant.

Des décennies plus tard, l'événement est devenu quasi mythique. Les retours des participants, dont la plupart sont devenus des chercheurs reconnus dans leur discipline, aident à contextualiser le déroulé de cet atelier scientifique. Ils expriment pour certains la faiblesse des avancées scientifiques obtenues lors de l'école d'été ou leur désintérêt pour le terme d'IA, tandis que d'autres rappellent le contexte scientifique dans lequel s'est inscrit la conférence : travaux sur le perceptron de F. Rosenblatt (1958), les premiers ordinateurs d'IBM (Moor 2006). Si le terme d'IA est né à cette occasion, il est clair que scientifiquement et épistémologiquement, ses principes étaient déjà en germe.

A ces projets technoscientifiques inspirants pour l'émergence de l'IA comme champ disciplinaire, il est possible d'ajouter le développement de la cybernétique, incarnée par N. Wiener ([1948] 2014). Son projet de recherche repose alors sur l'étude des systèmes techniques au travers de leurs réactions à des stimuli extérieurs. Chez N. Wiener, la connaissance d'un système (inerte, mais aussi vivant, voire social) repose ainsi sur l'établissement de relations entre des entrées / actions et des sorties / réactions. Entre concurrence scientifique et prise de relai, le champ de l'IA a emprunté aux travaux de la cybernétique (Favier-Baron 2023). Cependant, en opposition avec N. Wiener qui considère les machines comme étant en réaction continuelle aux contraintes imposées par leur environnement, de façon peu contrôlée, J. McCarthy envisage plutôt des machines froides et calculatrices (dans les deux sens du terme) devenues capables de raisonner (Anderson 2024).

Que suggère, dans son contenu, la première tentative de formalisation de l'IA comme champ scientifique ? Les organisateurs estiment, et cherchent à vérifier, qu'il serait possible de simuler par le calcul n'importe quel attribut de l'intelligence humaine pour le faire réaliser par une machine (McCarthy et al. [1955] 2006). Plusieurs exemples de problèmes théoriques sont décrits par les auteurs du projet, qui font l'hypothèse que le calcul pourrait les résoudre. Ils concernent la capacité des machines à produire du langage, à procéder à des abstractions à partir de données sensorielles, à apprendre sur des tâches précises, à se montrer créatives. De telles conjectures sont relativement fortes alors que nous sommes encore à la moitié du XXème siècle. L'éventail de ces problèmes est vaste et leurs difficultés ont probablement été sous-estimées, ce qui explique en partie l'échec initial des scientifiques à parvenir à leurs fins.

Depuis, la discipline s'est développée, et s'est diversifiée. Nous n'irons pas dans le détail de l'histoire de ce champ, dont des fragments ont déjà été racontés par ailleurs (Cardon et al. 2018). Dans un but de clarification de notre propre objet d'étude, nous nous contenterons de présenter plusieurs grands courants qui cohabitent dans la discipline.

IA symbolique, de premiers succès timides

Une première distinction utile sépare l'IA symbolique de l'apprentissage machine. Les systèmes d'IA symbolique ont connu leur gloire dans les années 1970-1980 et sont à la base des systèmes-experts (Cardon et al. 2018). Il s'agit essentiellement de dispositifs reposant sur la logique inférentielle. Des arbres de décision sophistiqués, construits sous la forme d'enchaînements « Si… Alors… » sont typiques d'une

telle approche. Les chercheurs s'affairent eux-mêmes à paramétrer leurs algorithmes, vus comme des ensembles d'instructions séquentielles déterministes (Knuth 1968), pour obtenir les conditions qui satisfont au mieux l'opération qu'ils souhaitent réaliser.

L'un des dispositifs d'IA symbolique les plus connus est l'agent conversationnel ELIZA, conçu par Joseph Weizenbaum en 1966. Il simule une conversation avec un thérapeute fictif. Pour ce faire, l'une des astuces consiste à répéter ce qu'affirme le patient potentiel (en remplaçant les « vous » par des « je » ou inversement), ou à glisser régulièrement des relances comme « Je vois » ou « Continuez » (Natale 2019). Si l'IA symbolique a perdu en popularité ces dernières années, des voix s'élèvent dans la discipline pour combiner l'approche symbolique avec celles basées sur l'apprentissage, dans le but de résoudre certaines des problématiques théoriques posées par ces dernières (Bhuyan et al. 2024).

Faire apprendre les machines

L'apprentissage machine (*machine learning*), justement, se fonde sur un processus d'entraînement préalable. Contrairement à l'IA symbolique, les paramètres du modèle ne sont plus fixés par les chercheurs[4], mais par des données d'entraînement. Selon les applications, le terme de données recouvre des réalités variées : il peut s'agir de variables issues de capteurs ou de formulaires administratifs, d'images, de texte, de voix, de la navigation sur Internet. Elles sont converties en nombres avant d'être traitées par un algorithme d'apprentissage qui pilote les paramètres du modèle à entraîner. Le but de l'apprentissage est d'optimiser la faculté du système à résoudre un problème donné, par exemple de la prédiction ou de la décision, sur la base de tâches de classification (assigner une catégorie discrète) ou de régression (assigner une valeur continue). Une fois l'entraînement terminé, il est possible de proposer de nouvelles données ou tâches au système, qui les traite et offre un résultat. La dépendance des dispositifs d'apprentissage machine à des données d'entraînement a des implications très concrètes sur leur fonctionnement, et notamment en comparaison avec l'IA symbolique. Ils souffrent pour la plupart d'une certaine opacité qui empêche la compréhension pleine et entière du mécanisme d'obtention des sorties à partir des entrées (Burrell 2016).

L'apprentissage machine regroupe à la fois des techniques et des approches. La séparation entre ces deux termes a ici avant tout une visée pédagogique. Les techniques d'une part correspondent à des modèles mathématiques particuliers qui se traduisent en architectures informatiques. Les approches d'autre part correspondent à des façons d'appréhender le problème à traiter. Certaines techniques sont spécifiques à des approches (et inversement), mais ce n'est pas toujours le cas.

Parmi les approches les plus publicisées figure l'apprentissage par renforcement. Cette approche est particulièrement adaptée à des environnements fermés et contrôlés, comme les jeux de société (échecs, go) ou les jeux vidéo (StarCraft II), où elle a montré des résultats largement médiatisés (Bory 2019). L'idée de base est de mettre en compétition des modèles en leur faisant réitérer une même tâche un grand nombre de fois. Les performances d'un modèle donné dans la réalisation de cette tâche sont mesurées à l'aide d'un système de score. A chaque itération, les paramètres du modèle qui a le mieux réussi la tâche sont conservés, et l'opération est reproduite en faisant varier légèrement les paramètres

[4] Ce n'est en réalité que partiellement le cas. Il existe des variables appelées hyperparamètres qui régissent le déroulé des entraînements, ou l'architecture des modèles, et qui peuvent aussi être optimisés *à la main*.

autour de cet optimum. Si l'apprentissage par renforcement pourrait être prometteur pour des applications industrielles, une revue de la littérature montre que son déploiement dans des situations de travail réelles n'est pas encore à l'ordre du jour (del Real Torres et al. 2022). Compte tenu de la difficulté à modéliser certaines contraintes au fil de l'apprentissage, les dispositifs d'apprentissage par renforcement peuvent encore se révéler dangereux (mouvements de bras articulés imprévisibles, par exemple).

Une précision sémantique supplémentaire peut se révéler utile pour traiter des différentes approches en apprentissage machine. On y parle distinctement d'apprentissage supervisé et d'apprentissage non-supervisé. Dans le cas de la supervision, les données d'entraînement fournies au système sont annotées (on dit aussi étiquetées, ou labellisées), c'est-à-dire affublées d'une annotation qui porte valeur de référence. Un dispositif qui vise à classer des images de plaques de silicium selon qu'elles portent ou pas des défauts peut ainsi être entraîné avec des images annotées *Plaque défectueuse* ou *Plaque non défectueuse*. Pour les systèmes d'apprentissage non-supervisé, il n'y a pas d'annotation et c'est au modèle lui-même de construire des catégories *ad hoc*. Un exemple concret est celui de certains algorithmes de recommandation sur les réseaux sociaux, qui proposent des contenus basés sur ce qu'un utilisateur pourrait apprécier compte tenu de son historique de visionnage.

Côté techniques, on en dénombre de nombreuses dans la discipline, parmi lesquelles les séparateurs à vaste marge (*support vector machines*) (Boser, Guyon, et Vapnik 1992) ou les forêts d'arbres décisionnels (Breiman et Cutler 2001). L'un de ces techniques, les réseaux de neurones, va particulièrement retenir notre attention.

L'IA connexionniste et « la revanche des neurones »

L'apprentissage profond (*deep learning*) est aujourd'hui une technique d'apprentissage machine particulièrement populaire dans la sphère scientifique comme dans la sphère commerciale. Il est généralement associé à l'IA connexionniste, en référence aux connexions au sein des réseaux de neurones artificiels qui constituent l'architecture clé de ces modèles. Dans le champ connexionniste, la métaphore cérébrale a en effet été poussée à son paroxysme. Les travaux pionniers dans le domaine se sont inspirés des tentatives de modélisation du neurone initiées au cours de la Seconde Guerre mondiale dans le champ de la psychiatrie (McCulloch et Pitts 1943). Ces modèles ont d'abord servi de base théorique aux thérapies par électrochoc administrées aux personnes souffrant de troubles mentaux (Dhaliwal, Lepage-Richer, et Suchman 2024). Pour autant, les réseaux de neurones artificiels ne reposent pas tant sur des modèles validés du neurone, c'est-à-dire de modèles visant à simuler le neurone humain : il s'agit plutôt de modèles qualifiés de « neuro-inspirés » (Dhaliwal et al. 2024). Ces neurones artificiels sont des unités de base de traitement de calcul qui reçoivent des entrées numériques de neurones de couches antérieures, les traitent, et les transmettent en sortie à des neurones de couches postérieures. La concaténation de ces couches constitue les réseaux de neurones.

La mise au point de la technique de rétropropagation du gradient[5] (Rumelhart, Hinton, et Williams 1986), et son application à la visualisation des codes postaux par l'équipe de Y. Le Cun (1989) ont laissé

[5] Cette technique permet d'ajuster les pondérations des signaux d'entrée de chaque neurone artificiel selon les résultats du réseau tout entier. Pour le dire plus simplement, au moment de l'apprentissage, chaque erreur aide à optimiser la capacité du réseau à réaliser la tâche pour laquelle il est conçu.

envisager des succès pour les techniques de traitement d'images basées sur les réseaux de neurones. Yann Le Cun sera d'ailleurs lauréat du prix Turing en 2018 (un équivalent au prix Nobel pour l'informatique) avec d'autres scientifiques pionniers, Geoffrey Hinton et Yoshua Bengio, pour leurs travaux sur les réseaux de neurones. Mis à la marge de la communauté de l'IA pendant une bonne partie du XXème siècle, les chercheurs en IA connexionniste ont dû attendre les années 2010 pour que le paradigme connexionniste devienne dominant, ce que D. Cardon et ses collègues (2018) appellent la « revanche des neurones ».

Nous arrivons au bout de notre entonnoir pour évoquer brièvement une dernière approche : l'IA générative, illustrée par des larges modèles de langage tels que ChatGPT. Les systèmes grand public de ce type relèvent de l'apprentissage profond, dont ils sont une sous-branche particulièrement développée. Ils se caractérisent, du point de vue utilisateur, par le type de contenu obtenu en sortie : texte, image, vidéo, voix. A ce titre, l'ELIZA des années 1960 relevait déjà de l'IA générative.

Leçons de la variété dans l'IA

La diversité des méthodes, techniques et approches que nous avons décrites nous invite à la prudence. Face à des dispositifs aussi différents et réunis sous une même bannière, nous ne pourrons décidément pas produire des affirmations sur l'IA en général sans précautions, au risque de tomber dans le piège des *véhicules*. Nous serons invités à cadrer précisément le périmètre dans lequel nos hypothèses, comme nos conclusions, seront rapportées. Ce qui réunit ces systèmes reste leur capacité à automatiser la production d'un contenu, qu'il soit décisionnel, prédictif ou audiovisuel. Cette automatisation première, il faut le garder à l'esprit, ne présage cependant en rien de ce qui peut être fait des résultats obtenus.

2.b. Rendre compte de l'éventail des discours sur l'IA

Des « arènes normatives » de l'IA

Au-delà des caractérisations techniques que nous avons explicitées, le terme d'IA fait l'objet de discours nombreux qui déportent l'attention de sa simple dénomination technoscientifique. Un remarquable travail de défrichage a déjà été proposé par B. Benbouzid et ses collègues (2022) pour distinguer différentes « arènes normatives » de l'IA. Ces arènes normatives correspondent à des espaces de débat, plus ou moins étanches, dans lesquels les participants cherchent à orienter l'évolution de l'IA dans certains sens, souvent contradictoires entre les arènes.

La Figure 3 présente une reproduction de la proposition des auteurs. Quatre arènes discursives y sont présentées selon deux axes. Un premier axe, horizontal, se rapporte à la façon dont l'IA est perçue par les contributeurs aux débats, soit comme une discipline scientifique, productrice de techniques et de savoirs (à gauche), soit comme un ensemble de produits et services, c'est-à-dire des systèmes d'IA particuliers, porteurs de valeurs et de fonctionnalités (à droite).

L'axe vertical n'est pas tout à fait celui qui figure dans la publication originelle des auteurs[6]. Il oppose deux visions sur la normativité de la technique, neutralité ou anti-neutralité, telles qu'elles sont revendiquées par les acteurs concernés. La première (en bas) est celle qui convient d'une forme de neutralité de la technique, dans le sens de considérer l'IA comme un ensemble d'outils. La technique, en ce sens, ne serait ni bonne, ni mauvaise : charge aux utilisateurs de bien utiliser ces outils. Pour les acteurs de ces arènes, un mauvais usage ne serait que le résultat d'une utilisation maladroite ou volontairement néfaste de ces dispositifs. La seconde vision (en haut) est anti-neutre. Elle peut être incarnée par des jugements normatifs explicites, ou au contraire se résumer par la formule astucieuse de M. Kranzberg (1986) qui affirme que la technique n'est ni bonne, ni mauvaise, ni neutre. L'argument vient prolonger les travaux de L. Winner (1980) sur la nature éminemment politique de la technique.

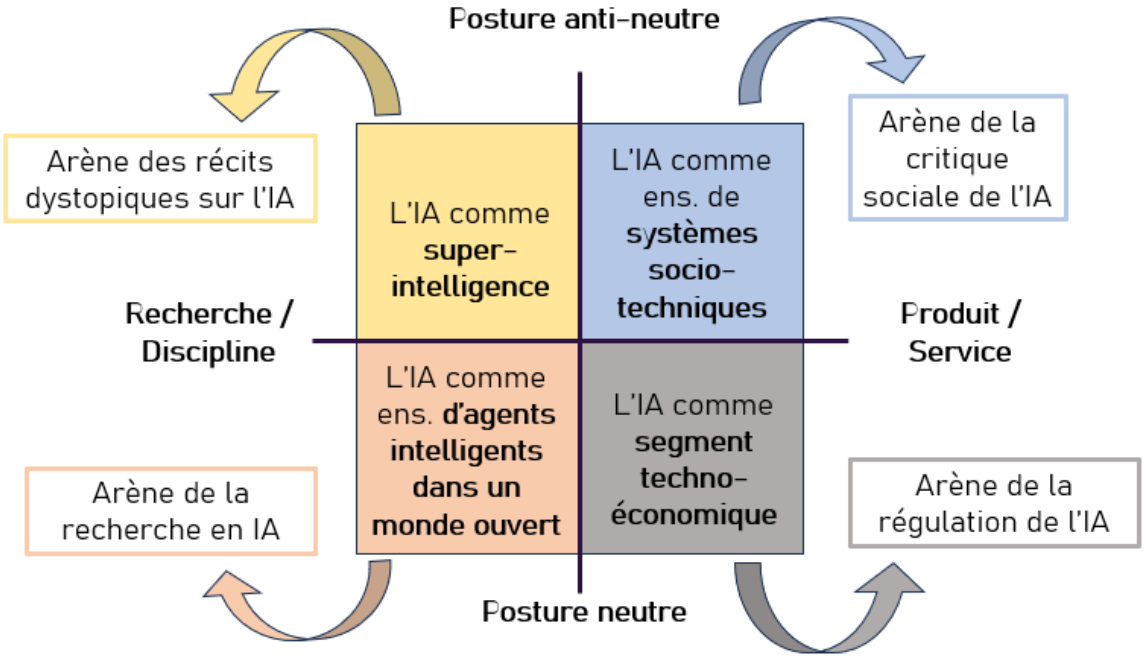


Figure 3 : Les arènes normatives de l'IA, schéma adapté de (Benbouzid et al., 2022).

Où peut-on situer notre enquête ? Pour l'évaluer, il nous faut rentrer brièvement dans le détail de ces arènes, ce qui nous permettra, au passage, de situer par avance les débats sur l'IA. La combinaison deux à deux de ces dimensions permet de rendre compte de quatre arènes normatives :

Une première arène est celle des récits dystopiques (Discipline – Anti-neutre). L'IA y est définie comme une superintelligence en puissance, un dispositif qui serait capable, à terme, de se fixer ses propres objectifs, et d'échapper au contrôle humain. L'arène est fortement influencée par des essayistes ou philosophes comme N. Bostrom ([2014] 2017), R. Kurzweil (2005, 2024). En France, l'entrepreneur et médecin L. Alexandre (2019) est l'un de ses représentants. Une discipline émergente, la sécurité de l'IA (*AI safety*) s'est constituée dans le but de concevoir des garde-fous techniques au développement d'une superintelligence devenue dangereuse (Ahmed et al. 2024). Ici, l'IA n'est pas neutre, car elle mènerait à une transformation profonde du rapport humain au temps et à sa propre existence. On assiste,

[6] L'ajustement a été proposé par B. Benbouzid lui-même à l'occasion de présentations données en préparation de son Habilitation à Diriger des Recherches.

au sein de cette arène, à un débat entre accélérationnistes enthousiastes d'un côté (Andreessen 2023) et de l'autre partisans d'un ralentissement, voire d'un arrêt de la recherche en IA, devenue trop dangereuse. Nous renvoyons pour cette dernière position à la lettre ouverte pour une pause, que nous aurons l'occasion d'analyser plus en profondeur (Future of Life Institute 2023). Cette arène fait l'objet de nombreuses critiques de la part des participants aux autres arènes, dont les contributeurs peuvent parfois balayer d'un revers de la main des hypothèses jugées fantaisistes. Ce discours ne peut cependant pas être ignoré étant donné sa prégnance dans l'environnement médiatique (Bellon et Velkovska 2023), d'autant plus que ses ressorts idéologiques reposent largement sur des considérations discriminatoires, eugénistes et autoritaires (Gebru et Torres 2024). Le discours de plusieurs dirigeants des géants du numérique, S. Altman (2023) d'OpenAI en tête, est largement infusé de ces idées. Ils sont pourtant attendus de l'autre côté de l'échiquier des arènes…

… c'est-à-dire celui de l'arène de la régulation de l'IA (Produit – Neutre). L'IA y constitue un segment techno-économique, un marché, avec ses fabricants, ses vendeurs et ses acheteurs. A ce titre, l'IA fait l'objet d'une régulation spécifique naissante, notamment à l'échelle de l'Union Européenne au travers du (2024) (*AI Act)*. Les législateurs ne sont pas les seuls à contribuer à cette régulation, au sens où les activités de lobbyisme mises en œuvre par les géants du numérique portent leurs fruits pour orienter les politiques publiques selon leurs intérêts, comme le montrent les enquêtes du journaliste T. Prévost (2025).

Une troisième arène concerne la recherche scientifique en IA (Discipline – Neutre). C'est depuis cette arène qu'a été produit le savoir scientifique qui a été décrit dans la section précédente. On y trouve l'essentiel de la communauté de recherche en IA. La normativité qui y est produite prend la forme d'une éthique internaliste. Elle y est essentiellement développée suivant des canons principistes, qui reposent sur des principes éthiques à favoriser : transparence, justice, bienfaisance, respect de la vie privée (Jobin, Ienca, et Vayena 2019). B. Benbouzid et ses collègues (2022) expliquent que la légitimité normative des chercheurs en IA tient notamment à une certaine appropriation de l'expertise du domaine, que ne possèderaient pas d'autres acteurs trop profanes. Les enjeux relatifs à la diffusion de ces technologies dans l'espace public y sont régulièrement assimilés à des problèmes techniques, auxquels ne peuvent répondre que des solutions techniques.

L'arène de la critique sociale de l'IA (Produit – Anti-neutre) conclut ce quadrant. Cette arène regroupe l'essentiel des chercheurs en sciences humaines et sociales qui prennent l'IA comme objet et qui tentent d'analyser la constitution des systèmes d'IA, leur intégration dans les organisations, leur propension à véhiculer des valeurs. L'IA y est ici entrevue comme un phénomène éminemment social. Cette arène, c'est celle dans laquelle s'inscrit cette thèse.

L'organisation, une arène oubliée ?

Le travail de B. Benbouzid et ses collègues (2022) est majeur pour situer les ambitions normatives des différents participants aux débats sur l'IA. Aussi divers que soient les positionnements présentés, il nous semble pourtant que des acteurs restent absents de cette cartographie. Ce sont les membres des organisations, privées et publiques, quel que soit leur échelon hiérarchique ou leur statut. Certains d'entre eux, à la tête d'entreprises, se réclament d'être des entrepreneurs et peuvent contribuer à l'arène de régulation économique de l'IA. Certes, et les autres ? Ils ne sont pas généralement pas des scientifiques

du domaine, pas vraiment législateurs, ne contribuent activement ni à la critique sociale ni aux récits eschatologiques de l'IA. Le monde de l'entreprise est traversé par des discours qui émanent des quatre arènes que nous avons présentées. En ce sens, il serait probablement compliqué d'inscrire les organisations industrielles au sein de la typologie, laquelle contribue plutôt à situer les arguments rencontrés au fil de l'eau.

Nous affirmons que les acteurs des organisations participent eux aussi à orienter les modalités du déploiement de l'IA au sein de leur environnement de travail. L'organisation est aussi, en cela un espace de production normative. Chacun pèse sur le devenir organisationnel des technologies, suivant différents enjeux propres à ses contraintes et objectifs, que l'on peut lister à grands traits : enjeux de gain économique pour les directions, enjeux de promotion des technologies et de succès organisationnel pour les déployeurs, enjeux de succès technique poursuivis par les concepteurs, enjeux de l'évolution du travail des salariés concernés par l'introduction d'un dispositif, qu'ils soient utilisateurs ou impactés par ricochets. Autour des pratiques et discours qui façonnent le travail prescrit et le travail réel, les intérêts individuels et collectifs, parfois divergents, s'expriment dans les projets de changement technologique. Ces intérêts s'allient ou s'entrechoquent, de sorte à définir un espace d'existence (ou d'exclusion) de l'IA au sein du cadre organisationnel.

2.c. Définir les activités industrielles

Formaliser l'industrie

Comprendre l'appropriation de l'IA par le secteur industriel invite enfin à éclaircir ce que recouvre exactement l'industrie. Nous proposons de considérer l'industrie comme un cadre organisationnel formalisé, au sein d'espaces géographiques délimités, avec des personnes salariées, prenant en charge des procédés de conception, de fabrication et / ou de déplacement des flux de composants et de produits, au travers d'activités automatisées ou manuelles[7].

Il s'agit d'une définition relativement large qui peut inclure la fabrication de voitures (Bailey, Leonardi, et Barley 2012; Carbonell 2020), de produits agro-alimentaires (Lloyd et Payne 2023), de vêtements (Van Oort 2019), mais aussi les activités logistiques dans les entrepôts ou supermarchés (Evans et Kitchin 2018; Gaborieau 2012, 2017) ou encore le travail sur les chantiers navals (Gekara et Thanh Nguyen 2018). Les entreprises industrielles emploient en outre des salariés qui ne sont pas eux-mêmes en charge des flux de production, mais qui gravitent malgré tout autour d'eux. Ils peuvent eux aussi être sujets au déploiement de nouvelles technologies en étant impliqués dans des activités de recrutement, de management ou de vente (Darr et Pinch 2013; Pachidi et al. 2021).

L'avantage de cette définition est de placer l'action de déploiement technologique dans un cadre formalisé où le travail est fortement prescrit et standardisé. Tout l'intérêt est alors de voir comment, dans l'introduction d'un dispositif technologique, ces règles formelles sont suivies ou bien contournées, pourquoi, et comment.

[7] Cette définition a été élaborée avec Thomas Reverdy.

Une industrie technicisée : la micro-électronique

La fabrication de composants micro-électroniques, qui a récemment fait l'objet d'une enquête en sciences de gestion (Blanc-Brude et Defélix 2023), correspond elle aussi tout à fait à cette définition. Univers encore méconnu de la littérature en SHS, l'industrie du semiconducteur met en œuvre des procédés productifs complexes pour réaliser des dispositifs destinés à intégrer des technologies numériques variées, des ordinateurs aux voitures en passant par les centres de données, les armes de guerre, et les convertisseurs d'énergie. A ce titre, les acteurs du semiconducteur sont particulièrement intéressants au sens où ils fabriquent les puces électroniques qui équiperont les technologies numériques dont ils se servent pour assurer leur production. La thèse aura largement l'occasion de décrire, en détail, le travail au sein de cette industrie.

Précisons par ailleurs, que nous confondrons abusivement acteurs du semiconducteur et de la micro-électronique. Même si ces acteurs n'opèrent pas exactement aux mêmes lieux de la chaîne de production, nous considérerons cette industrie dans sa globalité pour faciliter nos descriptions. Des enquêtes plus nuancées seront bienvenues pour affiner les réflexions que nous mènerons.

Pour l'instant, notons que l'une des particularités de cette industrie réside dans son positionnement à la pointe de l'innovation technique, nécessaire pour réussir à réaliser des opérations de gravure à des échelles du micro- voire du nanomètre. Il n'y a pas beaucoup plus dense en technologie – en termes de place prise, de complexité technique – qu'une salle blanche. On imagine bien, dès lors, que la salle blanche puisse être vide de toute énergie humaine ; bras articulés, machines de gravure et de nettoyage des plaques, dispositifs de transport auto-guidés y cohabiteraient en paix pour manufacturer le futur numérique de l'*Industrie 4.0*. Et ces équipements sont bien là, certes, mais les salariés aussi ! Ils s'affairent dans ce qui demeure en réalité une « fourmilière grouillante » (Blanc-Brude et Defélix 2023). L'automatisation n'a pas chassé le travail humain, bien au contraire.

Avant même le déploiement d'une nouvelle génération de systèmes d'IA, les salles blanches dernier cri figurent ainsi en bonne place parmi les environnements industriels les plus automatisés. L'industrie du semiconducteur constitue en un sens un cas limite, un *outlier* diraient peut-être les chercheurs en IA, difficilement généralisable à l'ensemble des organisations industrielles. Dans ce contexte particulier, le déploiement de systèmes d'IA apparaît-il véritablement comme une disruption, ou comme l'introduction d'un système technique *de plus*, parmi d'autres ?

3. S'entourer théoriquement pour réfléchir aux transformations numériques des organisations industrielles

Comment, à partir de nos interrogations premières, orienter notre travail de recherche ? Pour répondre à cette question, il nous faut inscrire notre problème au sein de la littérature qui a déjà investigué les relations entre technologie, travail, et organisation. Après un retour aux sources de la théorie sociotechnique, nous aborderons ici les apports de la théorie de l'acteur-réseau. La sociologie des

organisations, et en particulier son versant sociotechnique constructiviste, fournira enfin un cadre propice à notre analyse. Chacun de ces courants nous dotera d'outils pour mieux qualifier l'IA comme instrument technique socialement constitué.

3.a. L'héritage de la théorie sociotechnique

L'introduction de nouvelles technologies dans les organisations fait naturellement le lien entre de larges pans de la sociologie, eux-mêmes tentaculaires : sociologie des organisations, sociologie du travail, sociologie des technologies. Pour parvenir à mêler ensemble ces champs de la sociologie, au sein desquels cohabitent des pluralités d'approches, il apparaît utile de revenir aux racines de la théorie des systèmes sociotechniques.

La technologie comme système sociotechnique

Peu après la Seconde Guerre mondiale, E. Trist et K. Bamforth – ancien mineur – (1951) publient leurs travaux sur l'implémentation de la méthode d'exploitation de longue taille (*longwall*[8]) dans les mines de charbon britanniques. La lecture de l'article sonne d'abord déterministe : cette méthode aurait permis d'augmenter la productivité, ainsi que la qualité de l'expérience de travail et la cohésion des groupes. Mais les auteurs formulent une hypothèse relativement originale pour l'époque : le succès de cette nouvelle méthode de fonctionnement ne serait pas tant dû à la qualité des dispositifs mécaniques utilisés qu'aux pratiques de « défense de groupe » (*group defence*) déployées par les mineurs pour s'y adapter.

L'enquête montre que l'introduction de l'exploitation de longue taille, à l'aide d'outils mécanisés, a contribué à refaçonner les interdépendances entre mineurs. Auparavant formés à *tout faire*, les mineurs travaillaient en petits groupes solidaires et homogènes. Avec la mécanisation, ils se sont vu affecter des rôles précis, qu'ils conservent généralement tout au long de leur trajectoire professionnelle sans en changer. Une partie d'entre eux sont désormais affairés en équipe autour de la machine, qu'ils font translater le long de la paroi excavée. D'autres sont devenus des « remplisseurs » (*fillers*) chargés de remplir le convoyeur à courroie sur leur tronçon. Les vingt remplisseurs sont répartis tout au long de la paroi et ainsi séparés du reste du groupe. Face au stress, à l'isolement et à la dépendance induites par ce rôle, ils mettent alors en place tout un ensemble de stratégies : aider ponctuellement son voisin de paroi, blâmer ceux du bout de la chaîne, s'absenter ponctuellement pour tenir le coup physiquement. Sans ces adaptations, il est probable que la collecte du charbon soit moins efficace, malgré le caractère novateur des machines utilisées.

Les travaux d'E. Trist et K. Bamforth sont majeurs en ce qu'ils évitent l'écueil d'une analyse déterministe qui oublierait les facteurs organisationnels et établirait un lien causal direct entre machines et performance économique. Les auteurs font le lien entre l'introduction de systèmes techniques dans le travail et la reconfiguration de l'organisation du travail en mettant en avant les interdépendances entre acteurs et la variabilité des tâches. La reconfiguration que nous évoquons est le résultat conjoint (1) des contraintes

[8] Voir *https://www.youtube.com/watch?v=WmwEB4DY_jc* pour une illustration vidéo de ce procédé. Plutôt que de creuser vers l'avant selon l'image d'Epinal du mineur et sa pioche, cette technique consiste à miner sur une longue bande (pouvant atteindre plusieurs kilomètres), de façon latérale, en se déplaçant parallèlement au mur.

techniques liées à l'artéfact technique déployé, de (2) la façon dont ces contraintes sont prises en compte par l'organisation pour répartir le travail, et de (3) pratiques d'adaptation émergeant des marges de manœuvre investies par les travailleurs. La technologie n'a pas un effet en tant que tel sur l'organisation, tout dépend de comment elle est prise en charge, formellement (par l'organisation) et informellement (dans l'expérience vécue du travail). Ces hypothèses sont aujourd'hui largement partagées par la sociologie des organisations.

De tels résultats nous invitent dès lors à considérer le déploiement de l'IA comme un vecteur de contraintes particulières intégrées par l'organisation industrielle pour déployer ces technologies dans le travail. Notre enquête devra ainsi évaluer les modalités d'introduction de l'IA. Comment sont-elles pensées par les déployeurs ? Quelles tâches sont-elles supposées remplir, et dans quelles conditions ? Quelles stratégies les acteurs mobilisent-ils pour traiter avec ces technologies particulières ?

IA, système d'IA, dispositif d'IA

Nous avons déjà glissé subrepticement, sans prévenir, vers des formulations comme *systèmes d'IA* ou *dispositifs d'IA*. Il est temps de justifier ces dénominations qui découlent directement de l'approche sociotechnique.

Avant de discuter des termes retenus, parlons brièvement de ceux qui ne le seront pas. Il n'est pas rare de lire ou d'entendre dans le débat public des groupes nominaux comme *une IA* ou *les IA*, un procédé linguistique déjà relevé par B. Benbouzid et ses collègues (2022). Au-delà du manque de précision d'une métonymie trop réductrice, nous nous refuserons à ce raccourci dans la thèse. L'expression *IA*, prise toute seule, s'y rapportera soit au champ disciplinaire, soit à l'objet sociologique de discours, ce que le contexte explicitera en principe. Ce choix a notamment pour but d'éviter une simplification trop poussée qui accentuerait l'essentialisation d'objets techniques qui recouvrent des réalités pourtant différentes. Il vise aussi à se départir du langage anthropomorphisant qui associe à des systèmes techniques des traits propres au vivant ou à l'espèce humaine.

Pour qualifier les objets techniques intégrant des méthodes de l'IA, nous n'utiliserons pas non plus le terme d'artéfact, qui présuppose un système donné, figé (Orlikowski 2000). Un artéfact peut s'utiliser sans connaissance de son fonctionnement ni de son histoire matérielle (Rip et Kemp 1998). Le concept est relativement pauvre lorsque le but est précisément d'investiguer la coévolution d'objets techniques au contact de l'organisation dans laquelle ils sont intégrés. Autre terme mis de côté : l'IA comme outil. Le terme d'outil présuppose une dimension relationnelle positive avec l'utilisateur, qu'il pourrait équiper, voire « augmenter » (Ferguson 2019). Penser l'IA comme un outil revient à faire une hypothèse forte sur la relation entre l'individu et l'objet technique. La notion d'outil ne permet pas non plus de rendre compte de la variété et de la complexité des éléments qui intègrent les dispositifs intégrant des méthodes d'IA. Cette difficulté à appréhender techniquement l'IA ne permet ainsi pas de penser des objets comme des outils maniables, faciles à prendre en main et à réparer, selon la terminologie d'I. Illich ([1973] 2021).

Les concepts de systèmes sociotechniques (Akrich 1989) et de dispositifs (Dodier et Barbot 2016) nous paraissent plus adaptés pour caractériser les objets intégrant des techniques d'IA. Ces expressions permettent de mettre en valeur l'hétérogénéité des entités sociotechniques qui les composent. On peut compter parmi ces éléments des puces électroniques, des interfaces logicielles, des données

d'entraînement, des architectures algorithmiques de calcul, des classifications, qui sont autant d'objets qui peuvent susciter l'intérêt du chercheur. Il lui est alors possible d'investiguer les finalités attribuées à ces dispositifs par leurs utilisateurs et leur pouvoir de transformation des activités (Dodier et Barbot 2016). Réciproquement, ce sont les négociations des acteurs, mus par leurs intérêts et contraintes propres qui, de façon dialectique, orientent la conception des objets (Akrich 1989). La sociologie des techniques invite ainsi à explorer les entrailles techniques de l'IA. Pour évaluer les modalités d'intégration de l'IA aux activités de travail, il devient impératif de rendre compte des différentes entités qui composent ces systèmes et dispositifs d'IA. Nous emploierons de façon indistincte ces termes.

3.b. Les apports de la sociologie de la traduction

Alors que les discours sur l'IA foisonnent et ont largement l'occasion de se contredire, déceler les ambitions des acteurs en présence dans le déploiement de ces systèmes apparaît comme une étape incontournable de notre réflexion. Il ne suffit plus dès lors d'observer l'opérationnalisation des systèmes d'IA en tant que phénomène isolé, il faut également réfléchir aux logiques qui sous-tendent leur intégration dans les organisations. Nous sommes alors invités à prêter l'oreille aux différents points de vue impliqués dans ces transformations, indépendamment de leurs capacités d'action. La mobilisation de la sociologie de la traduction, incarnée notamment par les travaux de Michel Callon, Madeleine Akrich ou Bruno Latour, paraît judicieuse pour nous y aider. Ses tenants ont tâché d'étendre l'analyse sociologique pour considérer non plus des systèmes sociotechniques, mais des réseaux sociotechniques (Vinck 1995). D'abord appliquée à la recherche scientifique, la théorie de l'acteur-réseau vise originellement à rendre compte des mécanismes de production des savoirs, puis des artéfacts sociotechniques. Pour cela, elle étend l'analyse à l'ensemble des actants, humains, non humains, voire non vivants, impliqués dans ces processus. Constitués en réseaux, les actants impliqués établissent des relations les uns avec les autres. Ils cherchent à mobiliser des alliés, à se faire les porte-paroles d'autres actants, à se positionner comme des entités incontournables dans la résolution des problèmes qu'ils formulent.

Ce que capte l'acteur-réseau

En prenant en compte aussi bien des éléments sociaux que techniques, considérés indistinctement, la théorie de l'acteur-réseau remet la matérialité au cœur de l'analyse. Elle évite de tomber dans une analyse socio-déterministe qui n'analyserait la production de savoirs qu'au travers de facteurs purement sociaux. Dans l'article fondateur de M. Callon (1986), la fixation des larves de coquilles Saint-Jacques est un enjeu majeur pour les marins-pêcheurs et les scientifiques. Elle est rendue possible ou compliquée par l'environnement dans lequel elles sont immergées (température, maladies, prédateurs). En ce sens, les coquilles Saint-Jacques exercent une contrainte sur les acteurs intéressés à leur fixation, en allant à l'encontre de leurs objectifs, et ce, en dépit – à notre connaissance – de toute intentionnalité.

Comme le rappelle D. Vinck (1995:208), l'objet de la théorie de l'acteur réseau n'est pas d'établir des relations de causes à effet. D. Vinck explique ainsi qu'elle ne vise pas à une explication par les causes. La théorie de l'acteur-réseau est avant tout descriptive des formes d'attachement des acteurs au sein des réseaux. Elle cherche à « rendre compte de la construction et de la transformation des acteurs » (Vinck

1995:209) sans chercher à monter en généralité. La théorie de l'acteur-réseau ne permet ainsi pas de raisonner en termes de causes et d'effets sur le plan organisationnel, ce qui reste l'un de nos objectifs.

En dépit de ces contraintes théoriques, la sociologie de l'acteur-réseau nous incite à aller observer finement les productions des acteurs : discours, pratiques de travail, objets techniques. Tout, virtuellement, a son importance, tant que l'enquête s'attache aux problèmes érigés par les acteurs – par exemple le lancement de projets d'IA. A l'instar des coquilles Saint-Jacques, les systèmes d'IA sont porteurs de contraintes et d'opportunités. Ils sont décomposables en sous-éléments (bases de données, puces électroniques, interfaces), lesquels peuvent chacun faire l'objet d'une analyse similaire. A partir de cet examen exhaustif, il est alors possible de mettre en lumière des problématiques et débats qui vont au-delà de la sociologie des techniques pour trouver des échos dans les littératures qui concernent les organisations et le travail. *Via* une attention renouvelée aux réalités matérielles et relationnelles, la théorie de l'acteur-réseau nous offre ainsi le moyen de nous inscrire dans des débats plus larges. Sans constituer le cadre premier de notre analyse, elle nous donne malgré tout des pistes d'exploration empirique de notre sujet.

Une technologie comme une autre ?

A partir de cette attention donnée à la matérialité, comment situer les systèmes d'IA par rapport aux autres technologies qui habitent le quotidien ? Nous adopterons une posture volontairement ambivalente : l'IA renvoie à un ensemble de technologies numériques dont la spécificité ne doit pas dissimuler la banalité.

Ce que nous voulons dire par là, c'est qu'à l'instar de toutes les technologies, les dispositifs d'IA ont leurs spécificités propres – qui peuvent d'ailleurs varier selon les techniques et approches utilisées. Si l'on se restreint aux systèmes d'apprentissage machine, on peut compter parmi ces caractéristiques : leur fonctionnement (partiellement) non-déterministe, leur opacité relative (Burrell 2016), la difficulté à appréhender leurs résultats (Lipton 2016), leur capacité à produire du langage intelligible – pour l'IA générative. Notre approche visera à réinsérer l'importance de la matérialité dans la compréhension de phénomènes sociotechniques. Utiliser, concevoir, déployer un système d'IA, ce n'est pas comme utiliser, concevoir, déployer un autre dispositif.

Néanmoins, nuançons immédiatement cette position : les systèmes d'IA ne sont pas non plus des dispositifs particulièrement exceptionnels parmi la batterie des technologies numériques. L'engouement qui entoure leur promotion est, en réalité, relativement banal (Howcroft et Taylor 2014). L'usage de systèmes d'IA implique une mise à distance, une virtualisation de l'espace de travail, une médiation technique que l'on retrouve déjà dans de nombreuses technologies numériques. Etudier minutieusement le déploiement de l'IA, en ce sens, vise à repérer les particularités de ces technologies parmi les autres, mais aussi à comprendre en quoi elles s'inscrivent (ou non) dans des dynamiques organisationnelles similaires.

En ce sens, l'IA s'inscrit dans la lignée – désormais longue – des technologies numériques qui viennent pénétrer les organisations et qui suscitent l'intérêt de la recherche en sociologie. D'autres sont déjà passées par là, des machines-outils à commande numérique (Noble [1984] 2011) aux tableaux virtuels (Boboc 2021; Vayre et Igelsböck 2021) en passant par les systèmes-experts (Forsythe 2001; Hatchuel et Weil 1992) ou les logiciels de gestion de la production (Segrestin et al. 2004). En traitant le cas de

systèmes d'apprentissage machine particuliers, nous cherchons à nous insérer dans cette histoire disciplinaire riche de ses objets, de ses terrains industriels, et de ses traditions sociologiques variées.

3.c. S'ancrer dans la posture constructiviste pour intégrer la question du travail

Prendre la mesure des conditions de l'introduction de l'IA dans les organisations demande à se recentrer sur le contexte de travail dans lequel elles s'inscrivent. Notre analyse ne pourra faire abstraction du fait que les systèmes d'IA sont intégrés dans des organisations où l'on travaille : pour faire de l'IA, en utilisant l'IA – et pour bien d'autres choses.

Parmi les controverses qui agitent la sociologie figure justement la définition de la nature de l'activité de travail. Unanimement conceptualisée comme un processus social, l'activité de travail est cependant envisagée sous des prismes divergents. Nous en relevons brièvement deux : la théorie du procès de travail (*labour process theory*) et l'analyse stratégique. Nous tenterons de contourner ce débat, dont les deux parties apparaissent fructueuses pour notre analyse, en nous positionnant dans un cadre socio-constructiviste.

L'autonomie des acteurs et l'épineuse question du travail en sociologie

Dans la théorie du procès de travail, inspirée des analyses de Karl Marx, l'activité de travail est définie comme une forme de domination exercée par les propriétaires des moyens de production sur les travailleurs. Les écrits d'H. Braverman (1974) ont particulièrement inspiré cette approche qui constitue une critique directe du mode de production capitaliste. Pour lui, le changement technologique est essentiellement mis au service du profit des dirigeants. Il occasionne un large processus de déqualification qui dépossède les travailleurs de leurs capacités d'action et de leurs savoirs. Dans la même décennie paraissent les travaux de M. Crozier et E. Friedberg ([1977] 2014), défenseurs de l'analyse stratégique. Chez ses partisans, les salariés sont considérés comme un système d'acteurs plus ou moins interdépendants les uns des autres, quel que soit leur niveau hiérarchique. L'analyse porte alors sur les objectifs de ces acteurs, les stratégies qu'ils mettent en place pour les atteindre à partir des ressources dont ils disposent et des contraintes qui pèsent sur eux. Les projets de déploiement technologiques peuvent ici constituer des éléments de stratégie (remplir un objectif confié par la direction) mais aussi de contraintes, parce qu'ils perturbent le réseau d'interdépendances existant, ou de ressources offertes pour accomplir le travail.

Les deux théories s'opposent notamment en ce qu'elles postulent différentes formes d'agentivité chez les salariés. D'un côté, ils sont soumis à des contraintes verticales qui leur enlèvent toute marge de manœuvre. Pour y faire face, les salariés mobilisent des formes de résistance, qui peuvent prendre la forme de pratiques collectives. De l'autre côté, ils sont contraints par les interdépendances entretenues avec les autres groupes professionnels. Le contrôle hiérarchique est alors perçu comme une forme d'exercice du pouvoir parmi d'autres. La focale se place sur les adaptations informelles mises en place par les acteurs.

Serait-il possible d'imaginer que de telles approches nourrissent toutes deux une analyse de l'activité de travail ? L'industrie est certes sujette à des transformations macroscopiques, notamment sous l'impulsion de la numérisation. Ses effets microscopiques se font sentir car de nouvelles façons de travailler émergent, qu'elles soient imaginées par les salariés ou imposées par leur hiérarchie. Pris dans ces mouvements, pourtant, les salariés ne restent pas passifs et sont susceptibles d'accepter, négocier ou résister à ces changements. Que les acteurs soient décideurs de changement technologique ou concernés par celui-ci, il est possible d'apprécier et de rendre compte des marges de manœuvre qui leur sont laissées, et la façon dont ils décident de les investir.

Une sociologie constructiviste sociotechnique des organisations

L'une des pistes pour démêler cette difficulté théorique est peut-être à chercher du côté de travaux constructivistes sociotechniques portant sur l'intégration des technologies dans les organisations. Ceux-ci cherchent à mettre en évidence les mécanismes par lesquels les technologies sont déployées, conçues, utilisées. Il s'agit dans ce courant de souligner les facteurs sociaux (cadrages, normes, institutions, cultures, relations de dépendance ou de pouvoir) qui jouent un rôle dans les modalités d'intégration des technologies dans les organisations. Une idée centrale est celle de la réciprocité : les contraintes et opportunités présentées par technologies affectent les processus sociaux autant que les dynamiques sociales influencent la conception et l'usage des technologies.

L'un des travaux emblématiques de ce champ est celui de S. Barley (1986). Cet auteur a montré comment le déploiement de technologies similaires (des scanners à rayons X) dans des établissements en apparence similaires (des hôpitaux) pouvait pourtant affecter différemment l'expérience de travail. L'étude montre que des facteurs organisationnels liés aux choix d'affectation des personnels, à leur formation, à leur expérience, ou à leurs marges de décision jouent en réalité un rôle clé.

Dans leur article *What's Under Construction Here? Social Action, Materiality, and Power in Constructivist Studies of Technology and Organizing*, P. Leonardi et S. Barley (2010) élaborent un cadre théorique qui vise à étudier les phénomènes de construction sociale à l'œuvre à l'occasion de l'introduction de nouvelles technologies dans les organisations. Ils empruntent à la théorie sociotechnique une attention renouvelée envers l'importance des variables socio-organisationnelles. Par ailleurs, de la théorie de l'acteur-réseau, ils conservent l'intérêt pour la dimension matérielle des technologies dans les interactions humain-machine. Pour eux pourtant, une confusion subsiste. Les deux sociologues s'interrogent sur ce qui est véritablement construit dans les études constructivistes. Plutôt que de différencier ces analyses selon les registres théoriques mobilisés – théorie de la structuration d'A. Giddens (1984), théorie de l'acteur-réseau – ils préfèrent mettre en évidence une variété de phénomènes qui relèvent de temporalités et de mécanismes suffisamment différents pour être traités à part.

Dans un souci de distinguer ces différentes approches théoriques de transformation technique des organisations – et de transformation organisationnelle des techniques, P. Leonardi et S. Barley (2010) dénombrent cinq perspectives majeures : la perception, l'interprétation, l'appropriation, l'énaction (*enactment*), et la reconfiguration (*alignment*), voir (Tableau 1).

	Perception	Interprétation	Appropriation	Enaction	Reconfiguration
Phase d'implémentation	Adoption	Usage	Usage	Usage	Adaptation à long-terme
Phénomène social construit	Attitudes, croyances, valeurs	Schémas et cadrages	Conformité et déviation	Pratiques de travail	Rôles et interdépendances
Processus de construction	Influence sociale	Transmission	Interaction intra-groupe	Improvisations situées	Interaction inter-groupe

Tableau 1 : Approches socio-constructivistes dans le déploiement des nouvelles technologies par les organisations. Traduit de (Leonardi et Barley, 2010).

P. Leonardi et S. Barley justifient leur segmentation par l'ambition de gagner en finesse d'analyse dans le champ constructiviste. Ils envisagent ainsi plusieurs temporalités (avant le déploiement, lors des premières utilisations, en situation stabilisée), plusieurs points d'intérêt pour les sociologues (représentations du système ou de soi, modes d'utilisation, distribution du travail) et plusieurs échelles (celles des salariés, de l'organisation). Pour ces auteurs, tout l'intérêt de ce découpage théorique entre différentes perspectives est d'aller plus loin dans la compréhension des processus sociaux construits, en focalisant l'attention des sociologues vers des phénomènes bien particuliers.

Toutefois, il est aussi possible d'exploiter leur typologie pour faire exactement l'inverse, c'est-à-dire examiner le déploiement d'une technologie particulière sous un ensemble de facettes. Superposer ces angles de vue théoriques permet d'apprécier avec plus de richesse les relations de dépendances et de pouvoir à l'œuvre, évitant une analyse trop réductrice centrée sur une seule approche. Il nous est alors possible d'opérer de façon quasi biographique (Glaser, Pollock, et D'Adderio 2021a), en étendant l'analyse aussi bien en amont qu'en aval du processus de conception (Bailey et Barley 2020). Nous pourrons alors produire une monographie relativement exhaustive du parcours d'un système d'IA dans l'industrie du semiconducteur. Pour ce faire, nous pourrons examiner tour à tour plusieurs des différents cadres proposés par P. Leonardi et S. Barley.

Problématiser au carrefour des sociologies

Chacune des approches décrites par P. Leonardi et S. Barley nous permet de reformuler avec plus de clarté les questions que nous avons pu disséminer au cours de cette introduction. Nous avons choisi de retenir trois perspectives, qui permettent de balayer l'ensemble de la vie organisationnelle des systèmes d'IA en intégrant les pratiques de travail vécu : la perception, l'énaction et la reconfiguration. Pour compléter la proposition des auteurs, nous nous sommes équipés, pour chacune d'elles, d'autres champs de la sociologie utiles à préciser notre questionnement et outiller nos tentatives de réponse.

Une première perspective, celle de la perception, s'inscrit en amont du déploiement, et cherche à évaluer la représentation de la technologie avant les activités d'usage. Dans leur revue de la littérature, P. Leonardi et S. Barley mettent en lumière des situations dans lesquelles la représentation initiale de la technologie favorise ou complique l'adoption ultérieure des technologies. L'un des écueils de cette approche est son absence de standard à partir duquel les visions des technologies peuvent être évaluées.

Pour le résoudre, il est possible de mettre en lien les représentations des acteurs avec des discours génériques auxquels elles pourront être comparées. Pour ce faire, il apparaît utile mobiliser le champ de l'économie des promesses technoscientifiques (Dandurand et al. 2022; Joly 2015), qui repose sur l'examen des récits portant sur les bienfaits (techniques, économiques, sociaux) supposément apportés par les technologies, et diffusés par leurs promoteurs dans le but de faciliter leur diffusion. Pour mieux évaluer leur diffusion au sein des organisations, nous pourrons également nous appuyer sur l'approche ondulatoire des promesses suggérée par F. Lussier-Lejeune (2022), qui propose d'évaluer les promesses comme circulant entre des pôles d'émission et de réception. Nous pourrons également emprunter à D. Boullier (2023) le concept de « propagations » dans le but de caractériser la façon dont les promesses se diffusent. Les travaux en *Science & Technology Studies* (STS), en particulier les *critical data studies* nous permettront enfin de remettre ces promesses en contexte.

Une première question de recherche pourra donc être formulée de la façon suivante : comment les promesses concernant l'IA se propagent-elles dans l'industrie du semiconducteur et sont-elles mobilisées dans le cadre du déploiement de projets d'IA ?

Avant d'être mise à l'ordre du jour, cette question méritera d'être clarifiée pour caractériser effectivement ce que nous entendons par *les promesses de l'IA*. Pour ce faire, nous devrons d'abord en passer par une revue de la littérature qui cherchera à qualifier ces promesses en les remettant dans le contexte du récit de la quatrième révolution industrielle.

Inspirée par les travaux de W. Orlikowski (2000), notre deuxième approche, celle de l'énaction, s'intéresse aux usages des technologies tels qu'ils émergent dans l'action, de façon impromptue. Elle complète en cela la perspective de l'appropriation, qui fait référence à des « scripts » d'usage prévus lors de la conception (Akrich 1991), et à partir desquels il est possible d'évaluer l'adhésion ou non des utilisateurs. Face à des systèmes d'IA aux résultats pas toujours prévisibles, il apparaît utile de mobiliser cette notion d'énaction. Alors que la conception du système demande elle aussi des pratiques d'évaluation permanente (Wirth et al. 2025) qui invitent les concepteurs à expérimenter leur propre système, nous estimons que la notion d'énaction peut permettre d'analyser aussi bien des pratiques de conception que d'utilisation. L'énaction propose une analyse au plus proche de l'interaction entre l'individu et le système sociotechnique. Elle s'inscrit plus largement dans la théorie sociomatérielle, développée elle aussi par W. Orlikowski avec S. Scott (2008). Elle investigue les relations entre individus, technologies et organisations en prenant en compte des facteurs sociaux et matériels dans le sillage de la sociologie de la traduction. Pour réinscrire cette approche au sein d'une littérature constructiviste dédiée à la production de systèmes d'IA, nous nous appuierons sur une sociologie naissante de la conception algorithmique, incarnée par des auteurs comme C. Girard-Chanudet (2023a, 2023b, 2023c, 2025) ou F. Jaton (2017, 2020), qui s'inscrivent dans ce que ce dernier suggère d'appeler les *ground truth studies* (Jaton 2025).

Une seconde question de recherche sera dès lors : dans l'industrie, comment l'organisation du travail et les systèmes d'IA se construisent-ils mutuellement dans le cadre de la conception de ces dispositifs ?

Une dernière approche plus macroscopique, la reconfiguration, cherche à évaluer l'incidence à long-terme de l'intégration des nouvelles technologies. En examinant des situations avant, après (et parfois pendant) que celles-ci sont introduites, l'approche par la reconfiguration cherche à observer la recomposition de l'organisation en examinant les déplacements de responsabilités dans l'exécution des

tâches, les fluctuations des relations de dépendances entre les acteurs ou encore la transformation des modes d'apprentissage. Elle permet de dresser une cartographie organisationnelle des changements opérés. Pour nous approprier cette approche, pourrons nous appuyer sur une passionnante littérature qui traite des transformations numériques des organisations industrielles (Bailey et al. 2012; Blanc-Brude et Defélix 2023; Carbonell 2020; Gekara et Thanh Nguyen 2018; Jonsson, Mathiassen, et Holmström 2018; Pachidi et al. 2021). D'autant plus riche lorsqu'elle se fonde sur des matériaux empiriques, cette perspective invite à aller observer finement l'activité de travail. C'est pourquoi nous mobiliserons également des travaux de la sociologie de l'activité (Bidet, Datchary, et Gaglio 2017; Ughetto 2018a) et de la sociologie des organisations industrielles (Rot 1998, 2002), qui permettront d'éclaircir les liens entre expérience de travail, transformation organisationnelle et déploiement de technologies. Pour mener cette enquête, nous serons tout particulièrement intéressés à considérer l'évolution du travail de la salle blanche, où doivent être intégrés les systèmes d'IA.

Notre dernière question de recherche sera ainsi : comment le déploiement de l'IA s'inscrit-il dans la reconfiguration des activités de travail de la salle blanche ?

Sociologie des organisations, sociologie de l'activité, STS, économie des promesses : la thèse est traversée de nombreux courants théoriques. Tout au long de la thèse, nous aurons l'occasion de revenir sur ces approches pour situer notre travail. Le Tableau 2 renvoie aux sections qui introduisent plus spécifiquement ces éléments de cadrage. Nous mobiliserons également et plus ponctuellement la philosophie des techniques, l'éthique de l'IA ou les sciences de gestion. Le croisement de ces références multiples permettra d'enrichir l'analyse.

Cadre théorique principal mobilisé *Cadre théorique supplémentaire mobilisé*	**Lieu de la thèse où ce cadre est développé (**page cliquable)
Approche par la perception	Introduction du Chap. II, p.137
Économie des promesses	Introduction du Chap. I, p. 60
Approche par l'énaction	Introduction du Chap. III, p. 209
Théorie sociomatérielle	*Idem*
Ground truth studies	Section III.2, p. 235
Approche par la reconfiguration	Introduction du Chap. IV, p. 303

Tableau 2 : Repères des développements des cadrages théoriques au fil de la thèse.

4. Une étude ethnographique dans l'industrie de la micro-électronique

4.a. Contexte institutionnel et pratique de la thèse

Un projet européen d'innovation

La thèse a été financée par le projet d'innovation européen StorAIge[9]. Ce projet réunit un consortium d'une quarantaine d'organisations (multinationales, petites et moyennes entreprises, universités) de toute l'Europe (Allemagne, Belgique, France, Italie, Suède, Suisse, Tchéquie, Turquie). Le projet vise à développer et améliorer des technologies d'IA embarquée (*edge AI*). La majorité des applications de l'IA reposent encore à ce jour sur une communication auprès de serveurs distants (le *cloud*) dans lesquels s'effectuent les calculs, typiquement dans les centres de données. L'objectif de l'IA embarquée est de se défaire de cette contrainte de communication pour opérer les calculs directement dans les dispositifs qui en sont dotés. Dans le projet, les acteurs concernés cherchent à concevoir de tels dispositifs, de la puce à l'application (les *use cases*).

Dans ce cadre, et de façon tout à fait originale pour un projet technologique d'innovation à portée industrielle, la direction du projet a décidé d'allouer une partie du financement à une étude en sciences humaines et sociales relative aux impacts possibles de ces systèmes sur le monde social. Pour satisfaire cette ambition, Thierry Ménissier (PU en Philosophie), mon co-directeur de thèse, a été contacté en vertu de son rôle de directeur de la chaire Ethique & Intelligence Artificielle (2019-2024) de l'Institut Multidisciplinaire en Intelligence Artificielle (MIAI). Il a construit un projet de recherche avec Thomas Reverdy (PU en Sociologie), qui a ensuite accepté de diriger la thèse, faisant basculer la discipline principale de recherche de la philosophie vers la sociologie. C'est sur ce poste que j'ai été recruté en tant que doctorant sur un contrat de trois ans.

Le contexte particulier de la thèse a permis de nouer des contacts auprès de partenaires industriels. Il était originellement prévu qu'une partie du travail de recherche porte sur l'étude de l'intégration de l'IA dans les cas d'usage du projet. Nous étions intéressés à étudier des situations d'usage de ces technologies, en particulier dans des configurations de travail. Devant la faible maturité de ces dispositifs, dont la plupart étaient encore à un stade de développement embryonnaire, nous avons renoncé à cette ambition. Nous avons malgré tout maintenu notre volonté de réaliser une recherche qualitative, basée sur des observations empiriques. Ce n'était que de cette façon, de notre point de vue, que nous pouvions confronter les discours sur l'IA à des situations réelles et observées de déploiement, de conception, et d'usage. La quête d'éléments empiriques probants a ainsi prévalu sur la capacité à répondre aux questions de recherche initialement proposées. Nous avons renoncé à travailler autour des cas d'usage du projet, mais avons pu bénéficier de ce réseau pour trouver d'autres pistes de terrain d'étude.

[9] Compte tenu de ce financement, un texte de remerciement doit figurer dans le manuscrit, le voici : le projet StorAIge a reçu un financement de l'entreprise commune ECSEL Joint Undertaking (JU) sous le numéro d'agrément 101007321. JU reçoit le soutien du programme de recherche et d'innovation d'Horizon 2020 de l'Union Européenne et de la France, Belgique, République Tchèque, Allemagne, Italie, Suède, Suisse, Turquie.

Une fois ces terrains industriels ouverts, nous avons pu commencer à enquêter. Dans les deux structures où j'ai été invité à m'aventurer, j'ai bénéficié d'un accueil chaleureux où tout a été mis en œuvre pour mon confort matériel. Je suis très reconnaissant du temps qui m'a été accordé par l'ensemble des enquêtés, que j'ai parfois accompagnés durant des dizaines d'heures.

En plus d'alimenter notre recherche, et en particulier cette thèse, nos travaux se sont d'abord diffusés au sein du projet. Nous avons rendu compte de nos études conjointement avec la direction de la thèse auprès des autres membres du projet, en intervenant deux fois par an lors des assemblées générales, en contribuant à la rédaction de plusieurs livrables sur le changement technologique dans les organisations, et en animant un atelier d'initiation à la sociologie des organisations auprès des membres du projet.

Investiguer à SemiCorp

Une première étude de terrain longitudinale a été réalisée entre mai 2022 et février 2024 au sein de l'entreprise SemiCorp[10]. SemiCorp est une entreprise multinationale qui conçoit et fabrique des dispositifs à semiconducteur. Les entreprises clientes de SemiCorp intègrent ces dispositifs dans les appareils électroniques modernes (téléphonie, électro-ménager, armement, domotique, véhicules). SemiCorp est implantée sur le sol européen et emploie des dizaines de milliers de salariés. Dans un contexte économique favorable, l'entreprise augmente sa production. C'est à cette période que nous avons assisté à la réalisation d'un système d'IA pour le contrôle qualité, le ClassifiMotif. Ce dispositif a été conçu et déployé par une poignée d'ingénieurs au sein de « l'équipe IA », elle-même intégrée au service Qualité. La Figure 4 résume le contexte de l'enquête.

Mon arrivée dans le service Qualité du site de SemiCorp – que nous appellerons ponctuellement ThèseSite pour le différencier d'autres sites de l'entreprise – a été un peu particulière. L'un de nos contacts, cadre à SemiCorp, nous a mis en relation avec un ingénieur du service Qualité, qui nous a lui-même présenté à son manager direct. Or, quelques semaines plus tard, notre contact, le manager, et bientôt, l'ingénieur lui-même, ont tous changé de poste ou sont partis à la retraite. Toutes les démarches avaient été conduites pour que je puisse venir sur place, mais le cadre de l'enquête n'avait pas été pleinement formalisé. Les personnes désormais en charge de mon accueil n'étaient pas forcément à l'origine de ma venue, et n'avaient pas de demande particulière. Celle-ci a été clarifiée plus tard collégialement, notamment avec le manager de l'équipe IA, nouvellement créée, qui a supervisé l'ensemble de mon parcours à SemiCorp.

Cette succession d'événements a eu des conséquences en termes d'accès au terrain et de perspective méthodologique. J'ai d'abord bénéficié d'une certaine liberté pour suivre les discussions et réunions en compagnie des membres de l'équipe IA, avec qui j'ai établi une certaine proximité, et qui m'ont invité à les suivre dans leurs journées de travail. Présenté à l'ensemble de l'équipe, j'ai pu de façon ponctuelle suivre d'autres ingénieurs ou alternants dans leur journée ou demi-journée de travail. Après avoir insisté (lourdement) auprès du manager qui me supervisait, j'ai également pu faire plusieurs *shifts* en

[10] Les noms des entreprises investiguées, ainsi que ceux de tous les enquêtés, ont été pseudonymisés.

salle blanche où j'ai été reçu par une équipe de techniciens qualité qui ont eux aussi pris de leur temps pour m'expliquer leur travail.

Cependant, j'ai rapidement senti que ma position sur ce terrain pouvait être plus précaire que prévue. L'un de mes premiers jours sur site, j'ai été brièvement présenté, informellement, à l'un des directeurs du service Qualité. J'ai cru comprendre, lors de cette rencontre, qu'il n'était pas spécialement au courant de mon existence. Pas encore aguerri à l'enquête de terrain, je n'ai malheureusement pas pensé à prendre de note de cet échange. J'ai cependant le souvenir d'avoir annoncé, avec un enthousiasme un peu naïf, que j'étais doctorant en sociologie et que je m'intéressais à la façon dont l'IA était introduite à SemiCorp. Mon interlocuteur m'a alors expliqué comme si cela relevait de l'évidence que le but était d'améliorer les conditions de travail des salariés, et que c'était aussi simple que ça. Je retiens une certaine froideur, voire une méfiance, qui ne m'a pas encouragé à tenter d'établir plus de contact avec le management du service Qualité, ni du site de SemiCorp. Plutôt que de « [m]'imposer aux imposants » (Chamboredon et al. 1994), j'ai alors préféré ne pas tenter d'attirer leur attention. J'ai craint que la possibilité même d'être présent sur le terrain ne soit compromise. Ces sentiments qui ont été les miens et qui, je peux le concevoir, ont peut-être été le résultat d'une surinterprétation de ma part, m'ont conduit en tout cas à une certaine prudence dans mon enquête. Elle a également orienté certains choix méthodologiques.

Le lecteur trouvera dans l'annexe 1, un résumé chronologique des événements qui ont ponctué l'enquête à SemiCorp, voir (Tableau 14).

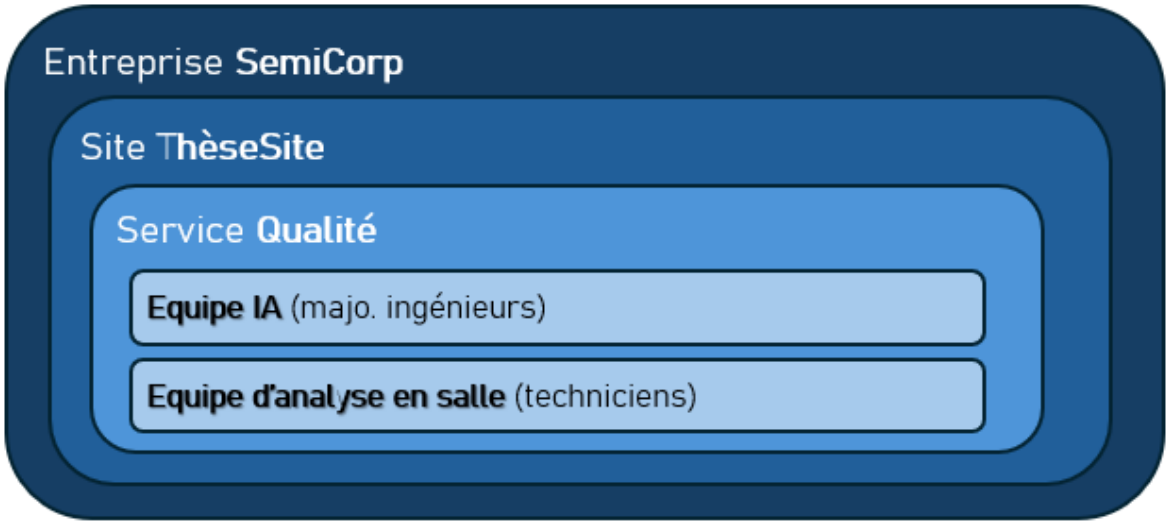


Figure 4 : Localisation de l'enquête ethnographique.

4.b. Méthodologie

Décortiquer l'IA dans l'organisation en analysant sa conception : une entreprise semée d'embûches

Au cours des années 2010, un pan naissant des STS, les *algorithm studies*, ont encouragé à enquêter sur le fonctionnement et les effets des algorithmes afin de mieux connaître ces objets à la présence culturelle grandissante (Dourish 2016; Seaver 2017). Leurs propositions peuvent s'élargir aux dispositifs

d'IA, qui reposent sur des algorithmes, qu'ils soient déterministes dans l'IA symbolique, ou d'apprentissage pour l'apprentissage machine. De tels systèmes algorithmiques peuvent être pensés, ainsi que le suggère R. Kitchin (2017:16), aussi bien techniquement, que computationnellement, mathématiquement, politiquement, culturellement, économiquement, contextuellement, matériellement, philosophiquement, éthiquement, *et caetera*. Dans le lot mérite bien sûr d'être ajouté *organisationnellement* au sens où ces systèmes s'intègrent à des dynamiques collectives préexistantes dans lesquelles ils peuvent perturber comme prolonger des phénomènes relationnels déjà à l'œuvre. L'examen du déploiement des systèmes d'IA dans les organisations n'est possible qu'à condition d'évaluer, précisément, ces variables organisationnelles : type de rapports hiérarchiques, distribution des tâches, conditions de travail, relations d'interdépendance, modes de communication.

R. Kitchin (2017:20) repère trois barrières à l'étude de tels dispositifs. La première est leur inaccessibilité. Le code informatique est rarement disponible, et quand il l'est, il peut rester difficile à appréhender (Burrell 2016). La remarque de R. Kitchin peut être prolongée pour les systèmes d'IA où le code en tant que tel n'est pas nécessairement au cœur de l'attention : d'autres éléments peuvent être sujets de pratiques de conception et d'utilisation, par exemple les cadres catégoriels et l'annotation des données (Girard-Chanudet 2023b). L'inaccessibilité peut alors concerner le dispositif d'IA lui-même autant que les modalités de sa mise au monde, recluses au sein de laboratoires de recherche et développement. Une deuxième barrière réside dans la multiplicité des éléments qui les constituent, mais aussi dans leurs origines. Des « centaines de mains », plus ou moins coordonnées, avec des motivations et des objectifs potentiellement différents, peuvent concourir à faire advenir ces dispositifs (Seaver 2019). Les repérer, les délimiter et les observer est alors un défi à part entière. La nature changeante des systèmes algorithmiques constitue une troisième difficulté, au sens où ils sont en constante mutation sous l'action de ceux qui se les approprient. C'est d'autant plus vrai dans des situations de travail où un dispositif peut être mis à l'épreuve et ajusté en continu.

Eléments de méthode, de l'ethnographie à la participation

Pour faire face à ces difficultés, R. Kitchin propose plusieurs pistes méthodologiques. Là où l'auteur se centre sur le code et sa production, nous élargissons la focale pour considérer le système dans la totalité de sa « matérialité numérique » (Leonardi 2010) et en prenant en compte aussi bien l'interface logicielle, le modèle d'inférence ou les cadres conceptuels sous-jacents. Nous proposons de rendre compte des six propositions de cet auteur pour expliquer dans quelle mesure nous les avons mises en œuvre, voir le Tableau 3 pour un récapitulatif.

Une première méthode est l'examen critique du système d'IA [du code[11]]. La proposition initiale de R. Kitchin vise à se confronter au code, à le lire et le comprendre. Une telle opération peut être étendue au dispositif tout entier. Nous l'avons mise en œuvre en rassemblant des documents décrivant le système (diaporamas de présentation, manuels à destination des concepteurs) et en observant des situations d'interaction avec le système : entraînement d'un modèle, modification de la base de données, évaluation des performances du système. Ces observations nous ont permis de forger des

[11] Nous indiquons entre crochets les propositions initiales de R. Kitchin, que nous avons adaptées ici à nos propres objets d'étude.

représentations du système entre théorie (fonctionnement prescrit) et pratique (fonctionnement réel dans les mains – ou les souris – des usagers).

Pour mettre véritablement en lumière les conditions de production des algorithmes, R. Kitchin invite deuxièmement le sociologue à s'y coller lui-même, c'est-à-dire à coder, ce que l'on pourrait appeler le travail réflexif de production du système d'IA [la production réflexive du code]. Bien entendu, cette pratique invite à garder à l'esprit la nécessité d'une mise à distance critique vis-à-vis de ce qui peut être ressenti par le chercheur. Néanmoins, elle permet d'offrir un point de vue plus incarné (cognitivement, corporellement, émotionnellement) des activités de production de l'IA. Invités à contribuer par les enquêtés ingénieurs de SemiCorp, nous nous sommes engagés dans des activités d'évaluation des modèles ou de nettoyage de bases de données. Il s'agissait aussi pour nous de consolider notre position sur le terrain en tâchant de nous rendre utiles auprès des enquêtés dans une logique de contre-don. Ce faisant, nos observations sont devenues participantes (Soulé 2008), de façon ponctuelle, sans qu'elles n'impliquent d'être embauché dans l'entreprise, voir par exemple (Peneff 1996). Une telle participation, comme l'a déjà relevé J. Favret-Saada (1990), constitue un « instrument de connaissance » à part entière, qui permet d'explorer des activités sociales de façon incarnée, et donc plus précise que si elles étaient seulement relatées. L'annexe 1 présente les différents temps de travail en autonomie réalisés dans le cadre de ces observations, voir (Tableau 18).

L'ingénierie inversée, troisième méthode proposée par R. Kitchin, vise à évaluer le comportement d'un modèle en calibrant des entrées spécifiques afin d'analyser les sorties résultantes. Nous ne nous sommes pas lancés dans cette entreprise, car nous n'avions aucunement le projet « d'ouvrir la boîte noire de l'IA » – une formule récurrente dans les études sur le sujet qui prennent comme postulat l'opacité de ces systèmes pour chercher à les décortiquer. Comme l'ont montré L. Vuarin et V. Steyer (2023:204), dans les organisations, « les experts métiers [sont invités] à valider la boîte noire plutôt qu'à l'ouvrir », et c'est précisément ce processus de validation qui nous a intéressés. Notre ambition était plutôt d'analyser les modalités de mise en œuvre des dispositifs, quel que soit leur fonctionnement interne. En ce sens, à quelques occasions, nous avons pu mettre en scène des situations contrefactuelles en demandant aux enquêtés comment ils auraient réagi s'ils avaient obtenu tel résultat plutôt que tel autre.

R. Kitchin encourage aussi les sociologues à se mettre en lien de façon étendue avec les personnes en charge du développement des dispositifs, en conduisant des études ethnographiques au sein des équipes de conception. C'est la méthode que nous avons privilégiée, de loin, en termes de temps passé à l'employer. Comme l'a rappelé F. Jaton (2019), de nombreuses enquêtes des *algorithm studies* se sont concentrés sur des objets stabilisés, loin en aval des réflexions qui ont conduit à leur conception. De telles appréciations en termes de fonctionnement technique des systèmes algorithmiques – que l'on retrouve dans certaines des méthodes de R. Kitchin – sont assurément utiles pour renseigner le chercheur sur la forme des productions sociotechniques de ces dispositifs. En revanche, comme l'explique F. Jaton (2019:316-17), « ces études peinent à considérer les hésitations, tests et autres dispositifs pratiques qui ont précédemment participé à la constitution de ces fonctionnements. S'ensuit la mise sous silence problématique d'une myriade d'objets, d'habitudes et d'équipements qui fondent pourtant la véridiction et la fonctionnalité des processus algorithmiques considérés ». L'ethnographie permet justement de se plonger dans la vie d'une équipe et son quotidien, d'appréhender les conditions matérielles et organisationnelles de production de l'IA. Plutôt que d'investiguer des incidents ou des

dysfonctionnements, il s'agit alors d'étudier la « marche "normale" des organisations » (Rot et Vatin 2017:11) pour comprendre le déroulement du déploiement d'un dispositif technique. Nous avons assisté à des discussions informelles, à des réunions, à des sessions de travail. Nous avons aussi déjeuné avec les enquêtés. Chacun de ces moments a été l'occasion d'en apprendre plus sur le fonctionnement de l'organisation. Ils invitent à ne plus seulement se concentrer sur l'IA mais sur le tissu organisationnel qui l'intègre.

Pour R. Kitchin, il est crucial de ne pas considérer les dispositifs algorithmiques comme isolés, c'est pourquoi il invite au déballage (*unpacking*) de l'assemblage sociotechnique de l'IA [des algorithmes]. Il faut pour cela les réinscrire dans l'environnement sociotechnique dans lequel ils s'intègrent. Le sociologue a intérêt à prêter attention aux discours promotionnels (en interne ou vers l'extérieur) associés à ces dispositifs, et plus largement à l'histoire et à la communication de l'entreprise concernée. De notre côté, nous avons transposé la réflexion en considérant non seulement l'entreprise mais surtout l'environnement organisationnel dans lequel nous étions plongés. Les systèmes d'IA constituent le cœur de l'étude, mais ils répondent à des objectifs organisationnels. Leur conception suit des pratiques contraintes elles aussi organisationnellement. Circonscrite au service Qualité du SemiCorp, notre analyse s'est limitée aux discours qui y circulaient. La demande d'anonymisation de l'entreprise a en ce sens constitué un frein pour rendre compte de certaines dynamiques socio-économiques trop identifiables. Les occasions de fréquenter des managers de haut niveau ont été relativement rares, ce qui pourrait aussi limiter la portée de l'analyse. Par contre, les réunions les réunissant ont été particulièrement fructueuses pour mettre au jour les objectifs de l'organisation. Finalement, nos observations en salle blanche ont permis de compléter ce tableau organisationnel.

Une dernière méthode réside enfin dans l'examen de ce que font les systèmes d'IA [les algorithmes] au monde. Au-delà de ce qu'*est* le dispositif algorithmique, R. Kitchin conclut sur la nécessité d'interroger ce que *fait* l'algorithme. Si la connotation semble relativement déterministe, la proposition de R. Kitchin cherche en fait à mettre en lumière les modes d'appropriation de ces technologies. Nous avons suivi pour ce faire des sessions de travail d'amélioration des dispositifs avec les ingénieurs et, plus rarement (à notre grand désarroi), des situations dans lesquelles des techniciens pouvaient être amenés à interagir avec le système. A ces occasions, nous avons pu observer comment les pratiques émergeaient au moment de la confrontation aux dispositifs d'IA.

Nous avons, en résumé, concentré notre attention sur le suivi au jour le jour et continu du déploiement d'un système d'IA au travers d'une étude ethnographique exhaustive. Nous avons cherché à nous départir des discours prospectifs sur l'IA en allant au plus près de sa fabrication, et de ses fabricants-usagers.

Méthode suggérée par R. Kitchin (2017)	**Mise en œuvre dans la thèse**
Examen critique des inscriptions	Lecture de documents de cadrage des dispositifs
Production technique par soi-même	Sessions de travail de nettoyage ou de conception de base de données
Ingénierie inversée	Simulation de situations contrefactuelles
Etude ethnographique	Partage du quotidien de l'équipe IA, suivi de ses réunions, des discussions entre ses membres
Déballage de l'assemblage sociotechnique	Elargissement partiel des observations aux managers et aux travailleurs de la salle blanche
Etude des effets	Observations de situations de travail au contact de dispositifs d'IA (dans la conception aux bureaux, dans l'utilisation en salle blanche)

Tableau 3 : Récapitulatif des méthodes employées.

4.c. Vie et traitement des données d'enquête

Récolter les données : jouer au stagiaire

Sur place, nous avons embrassé les principes de la « théorie ancrée » (*grounded theory*) décrite par B. Glaser et A. Strauss ([1967] 2022). Les données collectées sur les terrains ont d'abord été les plus exhaustives possibles, de sorte à dessiner une compréhension des phénomènes organisationnels en jeu. Elles n'ont pas émergé du néant, et ont d'abord reposé sur des « concepts locaux » (Glaser et Strauss [1967] 2022:140), c'est-à-dire des caractéristiques attendues du terrain, avec une portée explicative potentiellement limitée, mais qui permettent malgré tout de fournir de premières clés d'appréhension du problème.

Ces concepts locaux sont amenés à évoluer. Par exemple, la distinction première entre manager, ingénieur et opérateur, issue du discours tenu par les premiers enquêtés mais aussi d'une partition classique de la sociologie industrielle, s'est progressivement étiolée. Beaucoup de managers ont d'abord un bagage technique d'ingénieurs, au sens où devenir manager constitue une forme de progression hiérarchique. Ceux que l'on m'avait désignés comme des opérateurs, de leur côté, se définissent plutôt comme des techniciens qualité. Et certains d'entre eux, au cours de leur carrière, sont amenés à venir travailler hors de la salle blanche, parmi les ingénieurs. La segmentation spatiale et organisationnelle forte entre ces deux communautés – ingénieurs des bureaux et techniciens de la salle – nous a malgré tout conduit à conserver cette catégorisation naïve qui, il est vrai, est ponctuellement mise en défaut. La reconnaissance de la complexité de ces qualificatifs ne devrait pas nous forcer à rejeter en bloc ces catégories. Au contraire, elle permet d'apporter de la nuance à l'analyse.

Intéressés avant tout par l'obtention de données qualitatives et empiriques, nous avons dirigé nos efforts vers l'accompagnement des salariés au plus près de leur journée de travail. Nous avons ainsi régulièrement pris place au bureau, à leurs côtés, en regardant ce qu'ils faisaient. Ces temps ont constitué des phases d'observation active où nous étions moteurs de l'échange. Celui-ci était orienté par des questions basiques sur la pratique : *tu fais quoi ? pourquoi tu fais ça ? qui te le demande ? comment ça marche ? et il se passerait quoi si tu faisais ça ?* Contrairement à F. Jaton (2020), dont le laboratoire de recherche dans lequel il a été recruté constituait précisément le terrain, je n'ai pas été intégré comme un

membre de l'équipe à part entière. Cependant, mon âge et mon accoutumance aux méthodes de l'ingénierie m'ont permis de me mettre dans la peau d'un stagiaire ingénieur avec une certaine aisance. En me montrant curieux, intéressé et le plus empathique possible, j'ai essayé de rendre ces expériences agréables pour les enquêtés, de sorte qu'ils se sentent à l'aise en ma présence, malgré son caractère perturbateur. Il était ici question de déceler les motivations des enquêtés, leurs contraintes, leurs satisfactions, leurs mécontentements, en cadrant organisationnellement leurs interactions avec les systèmes d'IA. J'ai également pris soin d'aller observer le travail de collègues sans lien avec l'IA pour appréhender le service Qualité de SemiCorp de façon plus générale.

J'ai par ailleurs pu suivre les enquêtés lors de réunions, qui remplissent largement leurs agendas. En plus des réunions matinales qui servent à faire un point sur la situation du service Qualité, j'ai assisté à d'autres réunions relatives à la recherche d'idées de projets d'automatisation, à l'avancement du ClassifiMotif, à des présentations de changements à venir, à des bilans réguliers. Je ne suis quasiment jamais intervenu dans ces réunions et ai taché de me mettre en retrait : positionnement dans un coin, concentration sur ma prise de notes. Parfois, certaines réunions en très petit comité (deux ou trois personnes) se sont tenues aux bureaux des enquêtés, dans les *open spaces*. Il n'était pas toujours évident de les différencier de discussions plus informelles.

On trouvera dans l'annexe 1 des récapitulatifs des réunions suivies au quotidien et plus ponctuellement, ainsi que des temps d'échange privilégiés avec les enquêtés, voir respectivement les (Tableau 15), (Tableau 16) et (Tableau 17).

Consigner les données : un tableau des faits marquants

Dans un souci d'exhaustivité, j'ai pris de nombreuses notes sur des carnets dédiés. Cette opération était visible, je ne l'ai pas cachée. Les carnets sont cependant restés un jardin secret, qui n'avait pas vocation à être montré aux enquêtés. Pour fiabiliser la prise des notes, les propos des enquêtés ont le plus possible été transcrits tels quels. Puisque ceux-ci parlent plus vite qu'il n'est possible d'écrire, il en résulte que certaines citations peuvent être approximatives (elles seront indiquées comme telles dans le manuscrit le cas échéant) ou sinon, relativement courtes et / ou fortement tronquées. Parfois, c'est la synthèse des propos des enquêtés qui a été transcrite, non plus sous la forme de citations mais plutôt de notes brèves. J'ai aussi prêté attention autant que possible aux formes d'expression corporelle des enquêtés : haussement d'épaule, mouvements des mains, posture. Elles ont pu transcrire des idées ou des attitudes de façon éloquentes, plus que ne l'était parfois le propos qui les accompagnait. J'ai très ponctuellement eu l'occasion d'intégrer ces éléments aux analyses, lorsque leur interprétation me paraissait univoque et pertinente.

Tous les deux ou trois jours de présence sur site, j'ai consigné ces notes sur un tableur. Ce tableur a avant tout servi à consigner les informations. En cas de doute, ou pour recontextualiser un échange, j'ai pu m'appuyer sur les carnets de terrain. Les notes ont été segmentées en *faits marquants*. Sur chaque ligne figure un élément qui m'a paru notable, même s'il relevait parfois du détail. Chaque ligne du tableur comporte ainsi un fait marquant, qui peut prendre la forme d'une description factuelle, de l'interprétation d'une discussion, d'une idée qui a émergé d'observations *in situ*, ou d'un récit d'expérience. La variété de statut épistémique de chacun de ces faits marquants (entre faits descriptifs et idées à confirmer) a fait

l'objet d'une certaine attention, afin de ne pas mélanger des informations de natures différentes. A chaque fait marquant est ainsi associée une date (de collecte), un contexte (une réunion ? un échange informel ?), les personnes présentes, la transcription de l'échange (le cas échéant), la source de l'information (le cas échéant) et des codes.

Au total, j'ai collecté plus de huit cent faits marquants (+500 aux bureaux, +300 en salle blanche), qui ont servi de base au travail d'analyse.

Analyser les données : de l'empirique au général

Les faits marquants récoltés ont fait l'objet d'une analyse systématique et ont été catégorisés par des codes, dans l'objectif de réunir des faits portant sur des phénomènes similaires. Les codes utilisés pour qualifier les faits marquants sont largement restés thématiques. L'enquête s'est déroulée sur le long terme et je n'ai pas été en mesure de mettre en œuvre un système de codage pleinement satisfaisant. Les codes m'ont ainsi surtout servi de marque-page pour pouvoir rassembler des faits marquants portant sur des sujets similaires. La problématique rencontrée tient d'abord du nombre de faits marquants en question. La difficulté est aussi celle de s'en tenir à la théorie ancrée, qui rend difficile d'établir par avance un système de codage éprouvé.

La manipulation des faits marquants a permis de faire émerger de nombreux résultats qui constelleront l'ensemble de la thèse. Pour les obtenir, nous avons d'abord regroupé ces faits marquants pour former une description la plus précise possible du terrain, puis pour établir des liens entre différentes pratiques (organisationnelles mais aussi de conception, de travail, d'utilisation), afin d'établir des pistes d'explications causales. La littérature existante a joué un rôle majeur pour orienter l'attention de la recherche vers tel ou tel phénomène ou facteur. Dans l'objectif de contribuer à cette littérature, nous avons tenté, autant que possible, de mettre en lien ces résultats avec ceux d'autres études proches en termes d'objet ou de méthode.

Manques et regrets méthodologiques

Nous n'avons pas pu, lors de notre enquête, aller au bout de certaines explorations que nous souhaitions mener.

Le focus sur le suivi du travail en train de se dérouler n'a pas été complété par des entretiens, ce que nous avons déploré. Nous n'avons pas pu convaincre le manager en charge de ma supervision de réaliser des entretiens sur place, sur le temps de travail des salariés. Ces échanges, considérés comme non productifs, auraient constitué une perte de temps si l'on en croit nos interlocuteurs. Nous n'avons pas tenté de faire monter la demande plus en hauteur de la hiérarchie pour maintenir une certaine discrétion. Nous aurions pu organiser des entretiens les soirs ou les week-ends mais avons ultimement décidé de ne pas le faire, compte tenu de ma présence déjà soutenue sur le terrain. C'est pourquoi nous avons tenté, au maximum, de récolter durant les phases d'observations des éléments supplémentaires (biographiques, opinions). Concentrés sur leur travail mais ouverts à la discussion, les enquêtés pouvaient facilement se laisser aller à répondre à nos questions, dans la mesure où nous tâchions de ne pas transformer ces discussions en interrogatoires trop lourds.

Grâce aux efforts du manager assurant ma présence sur site, nous avons pu accéder au monde de la salle blanche, qui fera l'objet de développements à plusieurs reprises dans la thèse, en particulier dans les chapitres II et IV. Cependant, cette présence est restée relativement ponctuelle comparativement au temps passé au sein des bureaux, avec trois jours de présence en tout (deux jours de suite et un troisième quelques mois plus tard). Pour pallier cette asymétrie, nous avons fait en sorte d'effectuer une prise de notes exhaustive qui s'est révélée assez intense en pratique.

Enfin, parmi les éléments restitués dans la thèse, le lecteur pourra légitimement regretter l'absence de photographies. Encore une fois, pour des raisons de confidentialité stricte, nous n'en avons pas pris. Lorsque des illustrations se montreront pertinentes, elles seront reconstituées de façon légèrement modifiée au fil du texte.

4.d. Une enquête complémentaire à Mecanex, entreprise d'équipements mécaniques

Une seconde étude, bien plus courte mais tout aussi stimulante, a eu lieu en février 2024 au sein de Mecanex. Il s'agit d'une entreprise qui conçoit, fabrique et assure la maintenance d'équipements mécaniques utilisés notamment dans l'industrie du semiconducteur. L'entreprise projette d'intégrer de plus en plus de systèmes d'IA, en particulier dans les activités de maintenance. Nous avons réalisé une série de neuf entretiens auprès d'ingénieurs et de cadres pour s'interroger sur leur perception des systèmes d'IA. Ceux-ci ont été sélectionnés par nos contacts en interne. Ces entretiens nous ont permis d'avoir un point de vue plus gestionnaire sur le déploiement de l'IA dans les organisations, en obtenant des réponses de la part de décideurs ou, *a minima*, de responsables d'équipes.

A l'exception de l'un des entretiens, réalisé depuis chez moi en visio-conférence, tous se sont déroulés dans une salle de réunion vitrée prévue à cet effet par nos contacts à Mecanex. Considérés comme des temps de travail à part entière par le management, les temps d'entretien ont eu lieu sur les heures de travail des enquêtés. Nous nous sommes efforcés de suivre les conseils méthodologiques de L. Van Campenhoudt et R. Quivy (2011:58) en nous montrant sous un jour affable et bienveillant, en acceptant les propos tenus comme étant légitimes, en étant le moins directif possible et en se plaçant dans une posture d'apprenant curieux. La gestion des relances (*quand et comment faire approfondir les enquêtés ?)* et des silences (parfois difficiles à laisser couler) a fait l'objet d'un apprentissage progressif. En revanche, nous avons parfois laissé de côté notre posture de neutralité pour acquiescer et encourager les enquêtés à continuer à parler, ou alors pour les faire réagir sur un sujet particulier à partir d'une opinion fabriquée *ad hoc*, que je partageais plus ou moins selon les cas, sur le mode de l'entretien compréhensif (Kaufmann 2011).

Les sessions ont été enregistrées avec le consentement des participants qui ont signé à cet effet un formulaire qui leur proposait de rester anonymes. Les enquêtés seront désignés par leur fonction dans l'entreprise au moment de l'étude. Cette désignation a été validée par ceux qui souhaitaient conserver leur anonymat.

Les entretiens ont été transcrits entièrement manuellement pour certains, ou alors grâce au logiciel de transcription Tadddam[12], dont les productions ont demandé une relecture et une correction attentives, avec écoute. Ces textes ont été codés à l'aide du logiciel d'analyse qualitative QualCoder[13]. Les codes sont apparus au fur et à mesure du codage, parce qu'ils étaient attendus compte tenu de l'objet de l'analyse, ou alors parce qu'ils émergeaient du discours des enquêtés. Ils ont ensuite fait l'objet de résumés individuels, un par code, en établissant lorsque c'était pertinent des liens entre les codes. Ces analyses ont permis de faire émerger des débats internes, entre consensus et discordances. Ces débats ont été restitués à Mecanex lors d'une réunion sur le site de l'enquête, en juillet 2024. Par ailleurs, les résultats pertinents pour le cadre de la thèse ont pu être intégrés à la réflexion plus générale.

La différence de méthode de collecte des données à Mecanex par rapport à SemiCorp, contrainte par les modalités d'accès au terrain, ne nous a pas permis d'opérer de façon véritablement comparative. Dans le discours sur le déploiement de l'IA, nous avons pu constater des divergences qui apparaîtront dans des développements dédiés. En revanche, nous n'avons pas pu investiguer en profondeur, ni de façon empirique, les conditions même du déploiement de l'IA à Mecanex. C'est pourquoi ce terrain d'enquête sera absent des chapitres qui traitent de ce sujet.

Un récapitulatif des entretiens menés (Tableau 19), le formulaire d'autorisation à l'enregistrement (Figure 70) et le guide d'entretien (Tableau 20) sont présentés dans l'annexe 2.

4.e. Positionnement personnel

L'activité d'observation peut avoir des effets notables sur les phénomènes étudiés. Il serait illusoire d'imaginer proposer une interprétation parfaitement neutre d'un fait social en train d'être observé. Dans cette thèse dans laquelle nous avons été personnellement invités à donner notre avis aux enquêtés, à contribuer à leurs projets, à les conseiller ponctuellement, nous ne prétendrons bien sûr pas à l'objectivité. Notre point de vue sur nos terrains, que nous avons tenté d'élargir au maximum, continue à contenir des zones d'ombre, et est imprégné – plus ou moins consciemment – de nos propres façons de ressentir. Réflexivement, nous devons admettre produire des « savoirs situés » ainsi que l'épistémologie féministe les a théorisés (Haraway 1988).

Les paragraphes qui suivent visent à caractériser la manière dont nous sommes justement situés, à cheval entre plusieurs méthodologies technoscientifiques, en pointant les avantages et inconvénients qu'elles ont pu procurer. Avant de continuer, précisons tout de même que la dimension située de notre enquête, assumée, reste inscrite dans une démarche scientifique de mise en relation avec la littérature existante. Par la comparaison, par la mobilisation conceptuelle, par la description et l'explication, nous

[12] Le projet Tadddam, au sein duquel le logiciel a été conçu, a été porté par la Plateforme universitaire de données Grenoble Alpes, le laboratoire PACTE, le GRICAD et l'Université Grenoble-Alpes. Son ancrage est local et académique, les partenaires du projet garantissent l'intégrité des données – en l'occurrence les enregistrements d'entretien utilisés. Le logiciel repose sur des techniques d'IA qui ne permettent cependant pas d'automatiser complètement la transcription, laquelle doit être relue avec attention en réécoutant l'enregistrement.

[13] QualCoder est un logiciel libre, originellement développé par Colin Curtain et modifiable par la communauté, téléchargeable gratuitement à l'adresse suivante : *https://qualcoder.wordpress.com/*.

avons pour but de produire des connaissances utiles à la littérature scientifique et plus largement à toute partie intéressée.

Devenir (autant que possible) sociologue

Il serait malvenu de le cacher, je suis sur le papier ingénieur en traitement du signal et des données, diplômé de l'école d'ingénieurs Phelma (promotion 2019). Même si je n'ai jamais été salarié en tant qu'ingénieur, j'ai travaillé sur des projets de recherche dans le domaine en tant que chercheur stagiaire durant mon cursus dans l'enseignement supérieur. Ces expériences ont été enrichissantes, d'autant que j'étais professionnellement très bien entouré. En revanche, elles ne se sont pas révélées épanouissantes sur le plan personnel. L'une d'elles, en 2018, s'est inscrite dans le développement d'un système de reconnaissance dans un réseau de caméra, au sein d'un laboratoire franco-vietnamien. Pour le dire de façon euphémique, je ne retire aujourd'hui aucune fierté de cette contribution. L'année suivante en 2019, un second stage a cherché à développer un système de diagnostic algorithmique de la dysgraphie à destination d'enfants. J'ai été décontenancé, à ce moment, par l'absence de praticiens lors de la longue conception du système, autrement qu'au moment de l'annotation des données. Quel intérêt ? me suis-je plusieurs fois demandé. Ces premiers contacts avec la recherche scientifique m'ont convaincu d'adopter une posture plus réflexive sur la production des systèmes algorithmiques. L'exercice de la sociologie a, en ce qui me concerne, parfaitement su satisfaire cette ambition.

Ce changement de cap scientifique a également été un changement de méthode. Biberonné aux mathématiques et à la physique, l'intégralité de mon cursus m'a appris à penser en termes de problèmes et de solutions – solutions qui devaient nécessairement être techniques. Pour parvenir à résoudre ces problèmes, il fallait viser la vérité objective en faisant preuve de rationalité cartésienne. Tout, virtuellement, était quantifiable. C'est à ce prix qu'il était possible que l'ensemble de la société progresse techniquement et, par ricochets bien sentis, socialement.

La thèse de C. Roby (2014) documente ce paradoxe propre aux ingénieurs. Ils sont tout à la fois engagés pleinement dans la société, et relativement aveugles aux rapports de force qui y existent. Les technologies qu'ils produisent y sont encore perçues comme apolitiques et neutres, de simples outils qu'on peut bien ou mal utiliser. Au sein des formations d'ingénieurs, où la demande de réflexivité est de plus en plus forte et conduit à l'esquisse de trajectoires professionnelles particulières (Coutant 2025), les SHS prennent une place grandissante, mais encore limitée.

Mon directeur de thèse, Thomas Reverdy, lui-même diplômé en ingénierie, m'a encouragé tout au long de la thèse à ne pas me contenter d'être un ingénieur qui fait de la sociologie, pour me placer dans la posture d'un ingénieur qui devient sociologue. Bien accompagné dans cette entreprise, je me suis efforcé de garder cette distinction à l'esprit tout au long de mon travail. Le conseil touchait juste. Mon entrée vers les sciences sociales s'est produite dans le sillage d'une remise en question forte de l'ensemble de mon cursus d'enseignement supérieur, dans un contexte de sensibilisation personnelle aux questions sociales et environnementales contemporaines. Elle s'est initialement accompagnée d'un rejet quasiment en bloc des développements techniques au travers d'un positionnement normatif que je juge aujourd'hui assez caricatural.

L'accoutumance à la sociologie, ses théories, ses méthodes, ont été des outils opportuns pour me permettre d'ancrer et nuancer ma réflexion. Il m'a fallu progressivement développer une « sensibilité théorique » aux éléments pertinents et aux détails présents sur le terrain (Glaser et Strauss [1967] 2022:141), apprendre petit à petit à raisonner en sociologue, à écrire en sociologue. Les suggestions bienveillantes et réconfortantes d'H. Becker ([1986] 2007) se sont montrées particulièrement encourageantes pour l'apprenti sociologue que je suis (ou étais ?) : il n'y a pas tant de « bonne façon » (*right way*) de faire, tant que la posture adoptée est claire et assumée ; écrire s'apprend, et il n'est pas nécessaire d'être pompeux pour être clair ; chercher la perfection n'est pas fondamentalement utile. Ce processus d'apprentissage est propre à chacun et il n'y a pas qu'une voie pour y parvenir. J'espère avoir trouvé la mienne au cours de ce travail.

Se montrer (encore un peu) ingénieur

Plutôt que de changer de casquette, en réalité, les couvre-chefs se sont accumulés, de sorte à pouvoir dégainer le plus pertinent au bon moment. Au moment d'aller sur le terrain, en effet, ma proximité avec le monde de l'ingénierie a pu révéler quelques avantages.

Le premier a résidé dans la familiarité relative entretenue avec certains champs de l'ingénierie, en particulier l'IA et la micro-électronique. J'avais déjà bénéficié, dans mon cursus initial, d'une formation technique à ces disciplines. Ces savoirs, bien que partiels, m'ont été d'une grande aide pour comprendre les fonctionnements et agencements techniques présents sur mes terrains, ainsi que pour appréhender les méthodes de travail de mes enquêtés. Des apprentissages supplémentaires ont bien entendu été nécessaires, surtout dans le domaine de la micro-électronique industrielle, dont je ne savais rien, et dont j'ignore encore beaucoup. Il nous semble que ces apprentissages sont un passage obligé lorsque la matérialité des systèmes sociotechniques se trouve au cœur de l'analyse. Ils prennent cependant du temps et constituent clairement une barrière à l'entrée de ce type de terrain.

De façon plus inattendue pour moi, un second avantage est apparu dans la relation entretenue avec les enquêtés ingénieurs, qui représentent une grande partie des personnes rencontrées. A plusieurs reprises, j'ai expliqué de façon ambiguë faire une thèse en sociologie portant sur le déploiement de l'IA dans l'industrie. L'ambiguïté, qui n'était pas volontaire, portait sur ma discipline de recherche. La grande majorité des enquêtés n'étaient pas nécessairement familiers avec la sociologie et semblaient surtout retenir la partie « IA ». J'ai souvent senti une espèce de déclic chez les enquêtés au moment où ils avaient la sensation que j'étais du *même monde* qu'eux – au sens où nous pouvions avoir eu des expériences de socialisation communes durant nos études. J'ai eu l'impression qu'au travers de cette sensation de proximité, ils se sentaient plus à l'aise de se confier, de donner leur avis. Je n'étais plus le sociologue venu enquêter, mais l'ingénieur avec qui ils avaient une conversation, à tel point que l'on a pu me demander mon avis sur des sujets purement techniques. D'abord hésitant pour des raisons méthodologiques, j'ai fini par accepter de donner mes opinions en cherchant à obtenir l'implication des enquêtés dans leurs prises de position, de sorte à échapper à une posture de neutralité froide (Kaufmann 2011:52). Comprenant qu'être perçu par les enquêtés comme l'un des leurs pouvait être un avantage, je me suis employé, au moment de premières rencontres, à faire savoir que j'étais familier des sujets techniques évoqués, en explicitant mon parcours au sein de la sphère des écoles d'ingénieurs.

La confusion existante sur mon statut de sociologue a aussi pu me plonger dans l'embarras. En particulier, des enquêtés ont pu me demander d'œuvrer en faveur de l'adhésion des utilisateurs de dispositifs d'IA. Dans ces situations, la sociologie a été perçue par ces enquêtés comme un instrument « d'acceptabilité » de la technologie (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009). Une telle démarche m'a paru particulièrement inconfortable à assumer. Elle aurait pris le risque, il nous semble, de me placer définitivement du côté des décideurs. Nous avons pu, avec le soutien de la direction de la thèse, clarifier nos objectifs pour ne pas nous inscrire dans de tels projets.

Être (en fait) ce que les enquêtés perçoivent

Mon identification à la posture de l'ingénieur s'est parfois produite à mon insu sans même que je ne m'exprime : je n'avais alors pas la maîtrise de mes casquettes. J'ai en particulier le souvenir d'une réunion trimestrielle à SemiCorp, laquelle réunit de façon habituelle personnels des bureaux (ingénieurs pour la grande majorité) et personnels de la salle blanche (techniciens exclusivement). La réunion a lieu dans une grande salle, en dehors de la salle blanche : chacun a ses habits de tous les jours. Les chaises sont alignées en quinconce, un peu comme dans une salle de classe. Comme les deux mondes se côtoient peu physiquement, un tour de table est suggéré par les ingénieurs qui mènent la réunion pour que chacun se présente. Ce tour de parole est aussi bénéfique pour les techniciens qui connaissent peu ou pas leurs collègues techniciens des autres équipes. Ils ne se croisent que brièvement lors des relèves, dans des combinaisons qui couvrent la quasi-intégralité du corps. Pour une raison qui m'échappe encore, seuls les techniciens prennent la parole à tour de rôle : ils donnent leur nom, et leur équipe. Quand une personne s'est présentée, une autre dans l'assistance prend le relai, il s'agit généralement de la plus proche de celle qui vient de parler.

Je suis moi-même assis au milieu de la salle, en ayant bien veillé à être un peu isolé : ni trop proche des ingénieurs, ni trop proche des techniciens. Je me pense un peu naïvement inclassable. Alors que la parole tourne, je suis parcouru d'une hésitation car j'ai remarqué que seuls les techniciens se présentaient. Que dois-je faire ? serait-il bienvenu que je me présente ? J'en viens rapidement à l'idée qu'il serait pertinent que je me fasse connaître de tous, de sorte que je sois bien identifié au moment de prendre contact dans le futur.

Seulement voilà, au moment où cela pourrait être à moi de m'exprimer, un technicien d'une rangée derrière prend naturellement le flambeau, et le tour continue sans moi. Je ne me présente pas.

Que puis-je en conclure ? C'est simple : je *fais* ingénieur. Mes attributs physiques, ma façon de m'habiller, de m'asseoir, de me positionner à un certain endroit de la salle, d'assister à la réunion en prenant ostensiblement des notes, un mélange de certains de ces facteurs ou d'autres – que sais-je –, ont poussé ce technicien à me catégoriser comme tel. D'un coup d'œil, sans que je n'aie rien dit ou fait consciemment, je suis plutôt perçu comme ingénieur que technicien par ces derniers. Oui, l'enquêteur n'a pas toujours la maîtrise de l'image qu'il renvoie et, parfois, il est possible que cela lui apparaisse dans l'interaction avec les enquêtés.

Il n'est pas impossible que cette proximité perçue ait aussi constitué un frein à l'enquête. En particulier, j'ai eu l'occasion de passer du temps avec les techniciens en salle blanche pour suivre avec eux leur journée de travail. Les enquêtés devaient travailler en même temps que je les suivais, je n'ai donc pas

pu pleinement expliciter ma démarche comme je pouvais le faire en introduction d'entretien. De leur côté, les techniciens sont habitués à recevoir les ingénieurs lors de leur parcours d'entrée à SemiCorp. A ce titre, la présence d'un inconnu n'était pas particulièrement inhabituelle pour eux, et tendait, là encore, à me placer dans la posture de l'ingénieur-nouvel-arrivant. Je n'ai pas eu le sentiment que les techniciens que j'ai accompagnés se restreignaient particulièrement dans leur façon de me raconter leur expérience. Ils ont montré un regard réflexif sur leurs pratiques, sur l'organisation du travail, en n'ayant pas peur de me confier leurs critiques. En revanche, il m'a été impossible de recontacter, à l'extérieur, ceux qui avaient pourtant accepté gentiment de me donner leur numéro de téléphone. J'espérais ainsi pouvoir les interroger dans un autre contexte, plus posément. Malgré mes SMS, aucun ne m'a répondu. Changement de numéro, message simplement passé à la trappe, manque d'envie de se coltiner le sociologue une heure de plus en dehors du travail, faits ou gestes perçus comme déplacés que j'aurais pu faire : difficile pour moi d'expliquer ces rejets avec certitude. Il est possible que j'ai été identifié comme quelqu'un n'œuvrant pas spécialement en faveur de leurs intérêts (Beaud et Weber 2003:126), et que, de la sorte, il n'ait pas été pertinent de donner suite à mes messages.

5. Conventions adoptées

Nous avons adopté un certain nombre de conventions d'écriture et de structure de la thèse que nous explicitons brièvement :

Anonymisation et pseudonymisation. La totalité des enquêtés ont été anonymisés ou pseudonymisés. Les entretiens avec les enquêtés de Mecanex ont été enregistrés et les enquêtés ont signé une autorisation d'exploitation à des fins de recherche. Le qualificatif de ceux qui avaient explicitement demandé à être anonymisés dans le manuscrit a été validée auprès d'eux directement. Tous les prénoms présents dans la thèse sont des pseudonymes, choisis grâce au site développé par le sociologue Baptiste Coulmont[14].

Citations bafouées. Certains termes pourraient être trop identifiants pour les entreprises investiguées (jargon technique, termes spécifiques utilisés en interne). Nous en avons inventé d'autres – en accord avec les enquêtés concernés ou de notre propre initiative. Lorsqu'ils sont utilisés, ces termes ne seront pas mis entre crochets pour ne pas expliciter l'astuce, qui dégraderait son intérêt. Cela signifie concrètement que certaines citations sont erronées, parce que ces mots ont été remplacés sans que le lecteur n'en soit informé. D'autres modifications concernent (1) des troncatures, lorsque les citations sont trop longues, elles sont identifiées par « […] », ou (2) des explicitations contextuelles, également entre crochets.

[14] Baptiste Coulmont, qui a travaillé sur la sociologie des prénoms, met gracieusement à disposition un site qui permet de comparer les résultats du bac selon les prénoms des élèves : *https://coulmont.com/bac/*. Le site peut être détourné (et l'a déjà été) par les chercheurs de sorte à déterminer des prénoms proches les uns des autres dans une lecture en termes de milieu social. La méthode est ici dévoyée (aucun de nos enquêtes n'a passé le bac après 2012). Elle permet cependant de constituer une base pour le travail d'anonymisation, qui reste un enjeu important de la restitution des travaux sociologiques (Zolesio 2011).

Découpage. La thèse est divisée en chapitres (I, II, III), chacun étant divisé en sections (1, 2, 3), elles-mêmes composées de sous-sections (1.a, 1.b, 1.c).

Ecriture inclusive. Nous sommes attachés à la représentation de l'ensemble des individus dans la langue, quelle que soit leur identité de genre. La langue sociologique est encore très masculine (pluriel au masculin par défaut), malgré des efforts de certaines revues pour encourager la publication d'articles aux tournures plus inclusives. Malgré tout, pour des raisons de simplification de la lecture et de l'écriture du manuscrit, nous n'utiliserons pas le point médian. En parlant de groupes de personnes au pluriel, nous utiliserons ainsi le masculin mais, autant que possible, nous privilégierons des tournures épicènes. Enfin, nous emploierons l'accord de proximité.

Figures. Sauf mention contraire, les figures ont été réalisées par nos soins.

Guillemets et citations. Nous utiliserons les guillemets français (« ») pour citer des extraits, des concepts ou expressions attachés à des articles cités, de même que pour les verbatim. Lorsque ces citations incluront elles-mêmes des propos rapportés ou cités, nous utiliserons les guillets anglais (“ ”). Les citations textuelles seront rapportées telles quelles (l'italique sera par exemple conservé s'il est présent dans la version originale).

Italique. L'*italique*, justement, sera utilisé pour rapporter des mots en langue étrangère (anglais, allemand, latin). D'autres usages de l'italique pourront apparaître, par exemple pour des emphases (le plus rarement possible), ou pour servir de véhicule à des formes d'expression particulières.

Je et *Nous*. La thèse alterne le *je* et le *nous* selon les contextes d'énonciation. Il n'est surtout pas question de séparer l'individu du chercheur. Il s'agira simplement de distinguer, autant que possible, des formes de subjectivité qui s'expriment différemment. Parfois, des *nous* auraient pu être des *je* et inversement. Le *nous* vise à produire un discours qui cherchera notamment à accompagner le lecteur dans le cheminement du manuscrit. Plus largement, il désignera l'auteur en tant que chercheur. Le *je* est quant à lui utilisé pour expliciter des situations vécues personnellement, ou dans laquelle la subjectivité de l'auteur est trop importante pour être dissimulée. Nous emploierons par exemple cette première personne du singulier pour évoquer des situations de participation active à la conception du ClassifiMotif. Le *je* désignera ainsi l'auteur en tant qu'individu.

Traduction. Sauf mention contraire, les traductions des phrases en anglais ont été réalisées par nos soins. Les textes originaux sont quasi systématiquement présentés en notes de bas de page.

Usage de l'intelligence artificielle. Dans le cadre de la réalisation de la thèse, des systèmes d'IA ont pu être utilisés pour accompagner (1) la transcription des entretiens (Tadddam, voir (4.d)) et (2) la traduction de citations courtes depuis l'anglais (DeepL). Les productions algorithmiques ont été systématiquement revues et amendées. En dehors de ces cas particuliers, aucun système d'IA générative n'a été utilisé dans le cadre de la rédaction du manuscrit.

6. Plan de la thèse

La thèse sera découpée en quatre chapitres, voir (Tableau 4). Malgré des différences d'approches dans chaque chapitre, il est recommandé de les lire dans l'ordre car ils apportent des éléments utiles pour la suite de la lecture.

Le premier chapitre sera consacré à la qualification des promesses de l'IA dans l'industrie. Nous chercherons à comprendre comment, dans les années 2010, les promesses de l'IA et de la quatrième révolution industrielle se sont imbriquées pour satisfaire un agenda économique. Cet examen amènera à caractériser ces promesses sur la forme (comment promet-on ?) comme sur le fond (que promet-on ?). Nous porterons une attention particulière à expliciter le rôle de l'industrie du semiconducteur dans l'élaboration et la diffusion de ces promesses.

Dans le second chapitre, nous nous interrogerons sur les modalités de propagation de ces promesses au sein des organisations industrielles, et en particulier dans l'industrie du semiconducteur, dont nous dresserons les contours organisationnels. Nous verrons comment ces promesses peuvent être instrumentalisées dans le cadre de projets internes, tout comme elles peuvent être activement rejetées lorsqu'elles sont jugées incompatibles avec les objectifs de l'organisation.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse de la conception d'un système d'IA pour le contrôle qualité. Nous chercherons à montrer comment l'introduction d'un tel système repose sur un processus de reconstruction des savoirs au détriment des savoirs et pratiques existantes. Les processus et pratiques de conception et d'évaluation d'un tel dispositif d'IA industriel feront l'objet d'un examen détaillé. Il montrera la non-linéarité, la pénibilité, la difficulté à concevoir des systèmes d'IA fonctionnels, dont l'intégration reste contrainte organisationnellement.

Au travers d'une analyse du travail en salle blanche, le quatrième chapitre traitera enfin des reconfigurations organisationnelles à l'œuvre dans l'introduction de nouvelles technologies dans un environnement déjà dense techniquement. Nous verrons comment les techniciens qualité tâchent de maintenir une marge de manœuvre malgré la prescription croissante de leur travail, pourtant intense intellectuellement, par leur hiérarchie. En ce sens, nous montrerons comment l'IA se révèle être un nouveau jalon dans les tentatives d'automatisation du travail. Son déploiement participe à affaiblir des dynamiques d'apprentissage et de coopération déjà bien fragiles.

Chapitre	Contenu	Matériaux mobilisés	Cadrage théorique principal
I. Révolution industrielle et intelligence artificielle : recombinaisons de promesses pour une industrie du futur	Description et qualification des promesses de l'IA pour l'industrie et le travail : forme, fond, acteurs impliqués et leurs objectifs.	Revue de la littérature (analyse critique de discours)	Économie des promesses
II. Diffusion, propagation, et appropriation des promesses de l'IA dans l'industrie du semiconducteur	Réception et appropriation de ces promesses dans le milieu industriel de la micro-électronique dans le cadre de projets de déploiement d'IA : instrumentalisation, réinterprétation, rejet.	Étude ethnographique (SemiCorp, service qualité) Entretiens (Mecanex)	Approche par la perception Concept de « Propagations »
III. Mettre en œuvre l'IA industrielle : un travail des savoirs	Pratiques de conception de systèmes d'IA dans le contrôle qualité des semiconducteurs : travail de la donnée, travail conceptuel, travail d'évaluation.	Étude ethnographique (SemiCorp, service qualité)	Approche par l'énaction *Ground truth studies*
IV. Configurations et reconfigurations du travail de la salle blanche à l'heure de l'IA	Organisation du travail du contrôle qualité en salle blanche, dans un univers fortement technicisé : maintien de l'autonomie, dynamiques d'apprentissage et de coopération.	Étude ethnographique (SemiCorp, service qualité)	Approche par la reconfiguration Apports de la sociologie de l'activité et de la sociologie industrielle

Tableau 4 : Récapitulatif du plan de la thèse.

Chapitre I – Révolution industrielle et intelligence artificielle : recombinaisons de promesses pour une industrie du futur

« Il y a des biologistes dans la salle ? » Les têtes, curieuses, se tournent, espérant voir une main se lever. Mais personne ne répond à l'appel. « Bah ils feraient mieux d'être là ! » Plusieurs sourires s'esquissent. Plus tard, l'intervenant réitère, avec les chirurgiens, les comptables, tout un tas de professionnels qui auraient dû être là. Le public est sensible au comique de répétition, les rires fusent. C'est vrai, il aurait fallu être présent, en cette après-midi de mai 2024, pour assister à l'exposé de ce jeune PDG et co-fondateur d'une startup spécialisée dans la conception de solutions d'IA sur-mesure, Neovision. La présentation, intitulée « Pourquoi l'IA va transformer tous les métiers ? », détonne pour qui a l'habitude des grands effets d'annonce dans le domaine de l'IA. Sur le sujet, les discours grandiloquents sont légion.

Il suffit de revenir quelques minutes plus tôt : le public – en majorité des ingénieurs, mais aussi des curieux, démarchés, peut-être comme moi, sur LinkedIn – en a eu plein les yeux. Deux représentants de Nvidia, une multinationale étasunienne spécialisée dans la conception de puces électroniques, de cartes graphiques, et dans l'édition de logiciel, dévoilaient alors une vidéo promotionnelle, « I am AI »[15]. Le clip démarre par un écran noir, sur lequel se mettent petit à petit scintiller des étoiles. Le décor est planté : nous sommes dans l'Univers. A l'écran, celui-ci se transforme rapidement en un ensemble de fils brillants qui rappellent la connectique électronique. La narration est assurée par une voix de synthèse féminine se présentant successivement comme une navigatrice, une visionnaire, une aide, une formatrice, une guérisseuse. A chacun de ces termes sont associés des applications des capacités de « AI » : elle corrige le mouvement de l'apprenti kinésithérapeute et entretient un équipement électrique à l'aide d'une main robotique, elle crée de nouveaux médicaments et conseille les patients sur leur traitement, elle guide les personnes aveugles[16] et donne une voix à celles qui sont muettes, elle assiste à l'écriture du script de la vidéo et compose sa musique. Le tout est assez impressionnant, il faut le dire. Que ne peut donc faire « AI » ? Après cela, on n'est guère étonné de lire, dans la présentation PowerPoint des deux salariés de Nvidia, que « L'IA accroît la productivité et la créativité de plusieurs ordres de grandeur dans tous les secteurs d'activité ». La sentence se passe de preuve, elle ne fait que cristalliser l'évidence.

Pourtant, alors que le PDG de Neovision s'exprime à son tour, le discours est un peu différent. Il n'est pas question de robotisation de masse, ni d'exponentialité de la productivité. Simplement, les métiers vont changer. Les agents de maintenance feront moins de vérification et plus de prévention, le contrôle qualité pourra analyser toute une production (et pas seulement un échantillon), les professions médicales feront moins d'erreurs, seront outillées par des systèmes d'aide à la décision, *et caetera*. De nouveaux emplois, pour des nouveaux métiers, vont même émerger : il faudra des *data scientists* pour organiser et

[15] I Am AI | NVIDIA GTC 2024 | Official Keynote Intro, sur la chaîne YouTube de Nvidia : https://www.youtube.com/watch?v=jMW8_YVFgzY

[16] La référence biblique à l'Evangile de Marc, narrant comment Jésus rendit la vue à l'aveugle de Bethsaïde, est ici à peine dissimulée.

préparer les données d'entraînement, des *ML engineers* pour développer et optimiser les modèles, et des *MLOps engineers* pour déployer et mettre à jour les systèmes.

Alors, qui a raison ? Les systèmes d'IA à venir vont-ils révolutionner le paysage professionnel, ou simplement modifier les métiers existants, par petites touches progressives ? La question, au risque de décevoir, n'est pas celle que nous chercherons à résoudre. Ces deux options, si elles paraissent faire diverger les futurs possibles, prennent en réalité, des formes très similaires. Sur le fond, elles constituent des promesses, des alternatives, certes, qui varient plus dans leur nuance que dans leur nature. C'est justement autour de l'appréciation des promesses que ce chapitre, et le suivant, aborderont la représentation de l'IA dans l'industrie.

L'économie de la promesse

Les promesses sont récemment devenues un objet d'étude pour les sciences humaines et sociales francophones (Giraud 2001), et plus particulièrement en sociologie (Audétat et al. 2015; Dandurand et al. 2022). Les promesses sont des énoncés particuliers, adressés, qui dessinent une vision de l'avenir. Mais contrairement aux promesses solennelles que l'on ferait à un proche, les promesses technoscientifiques n'engagent pas nécessairement ceux qui les formulent. Elles se caractérisent comme l'irruption du futur dans le présent, une façon d'orienter la vigilance des acteurs économiques vers une innovation pour favoriser ses développements, sa diffusion, son succès. En cela, les promesses portent une forte « dimension relationnelle » (Joly 2015) entre celui à qui l'on promet, et celui qui promet.

Parmi ces faiseurs et écouteurs de promesses, F. Lussier-Lejeune (2022) distingue cinq profils d'acteurs, entre recherche, industrie et États :

Les premiers sont les chercheurs-entrepreneurs, en particulier des scientifiques que les réformes successives de l'enseignement supérieur ont guidés, à marche forcée, vers des logiques entrepreneuriales. Leur travail, constate l'auteure, n'est plus seulement de produire et diffuser le savoir, mais de faire en sorte que ces savoirs puissent être rendus économiques profitables, et rentabilisés. C'est (parfois) malgré eux qu'ils se trouvent à devoir valoriser (à tous les sens du terme) leur recherche. Par exemple, une étude autour de l'ingénierie du nucléaire montre comment des visions positives du futur associées aux petits réacteurs nucléaires modulaires sont intégrées dans des articles scientifiques pourtant consacrés à des sujets techniques (Sovacool et Ramana 2015). La présence de tels arguments est une manière, selon les auteurs, de promouvoir un avenir associé à des émotions positives, mais aussi de dissimuler les difficultés liées à la commercialisation de ces réacteurs.

Un second groupe est composé d'acteurs privés, les entrepreneurs qui cherchent à opérer une « mise en récit » de la promesse. Ils se rendent responsables de la définition d'un « horizon d'attente » à partir duquel se construisent les représentations de l'innovation technique. Ils peuvent ainsi exagérer et / ou interpréter des résultats scientifiques de sorte à les inscrire dans un récit plus général, dans lequel ils se positionnent comme des acteurs incontournables. A ce titre, l'entrepreneur Elon Musk, temporaire soutien financier et moral de Donald Trump et de partis européens d'extrême-droite (Conesa 2024), est une figure emblématique de la construction de récits techno-futuristes – voir, par exemple, son projet de colonisation de Mars, qui renvoie au récit cosmiste de B. Goertzel (2010). En rachetant Twitter (devenu X), l'un des réseaux sociaux les plus suivis, il a pu diffuser largement sa propre communication en faisant en sorte

de prioriser ses sorties dans le fil d'actualité des autres utilisateurs (Schiffer et Newton 2023). Le profil particulier d'Elon Musk n'est bien entendu pas représentatif de ce groupe d'acteurs. Pour eux, la construction de récit est d'abord un moyen pour une fin, c'est-à-dire attirer les fonds vers eux depuis d'autres types d'acteurs.

Un troisième groupe, celui des investisseurs, finance justement les projets émergents qu'ils trouvent les plus convaincants. Ils peuvent opérer selon deux modes. Le premier est celui des investisseurs en capital-risque (*venture capital*), des fonds d'investissement qui accompagnent financièrement le lancement de startups naissantes, n'ayant pas encore fait leurs preuves, mais mobilisant un récit suffisamment persuasif – pour eux-mêmes, mais surtout pour d'éventuels futurs consommateurs. Dans son livre *Behind the Startup*, B. Shestakofsky (2024) a produit une étude ethnographique remarquable montrant comment cette logique d'investissement peut guider les choix techniques mais aussi les conditions de travail et les modes d'organisation des startups. Un second mode est celui de l'investissement en capital-actions, qui consiste à jouer le jeu boursier en se munissant d'actions dans les entreprises ayant un fort potentiel économique. Dans les deux cas, intéressés financièrement par la bonne diffusion des technologies promues, les investisseurs participent, même involontairement, à relayer les discours à leur sujet, comme l'indique F. Lussier-Lejeune (2022:58) : « En injectant du capital financier, ils ajoutent du crédit à la promesse et augmentent ses chances de réalisation. »

Un quatrième groupe concerne les décideurs publics, qui débordent sur les deux versants de la promesse, aussi bien en amont qu'en aval. Citons à nouveau F. Lussier-Lejeune qui décrit leur positionnement : « [d]'une part, la mise en place de programmes de recherche, de politiques et de cibles gouvernementales contribue à la production et à la circulation de promesses techno-scientifiques et représente le pôle émetteur des décideurs publics », écrit-elle, « [d]'autre part, leurs investissements substantiels dans les promesses de révolution véhiculées par les chercheurs-entrepreneurs et les entrepreneurs de l'industrie caractérisent leur pôle récepteur » (2022:61).

Un cinquième et dernier groupe est enfin celui des cabinets de conseil privés, qui évaluent au travers d'une veille technologique l'intérêt des innovations pour encourager leurs clients à les déployer ou non. Ils se positionnent en quelque sorte comme des arbitres chargés de confirmer ou d'invalider les espoirs portés dans les technologies. Le cabinet de conseil étasunien Gartner est emblématique de ces estimations sur la maturité des technologies au travers de sa courbe du « cycle de l'engouement » publiée annuellement[17]. Mais ces firmes peuvent se montrer juge et partie – à l'instar de McKinsey qui investit dans des startups de l'IA – et bénéficier directement de la promotion qu'elles peuvent faire des technologies, aux points de vue technique et économique (Lussier-Lejeune 2022). P.-B. Joly (2010) a montré comment le recours aux promesses s'est systématisé, au point de le qualifier de « régime de promesses ».

Comme toujours lorsque l'on crée des catégories, celles-ci sont facilement attaquables, parce que leurs composantes peuvent coïncider localement. Par exemple, certaines grandes entreprises disposent en

[17] Cette courbe décrit un ensemble d'étapes clés par lesquelles passerait toute technologie au fil du temps, du point de vue des attentes qu'elles génèrent : déclenchement de l'innovation, pic d'attentes exagérées, creux de la désillusion, retour en grâce, et plateau de la productivité. Très attendue chaque année, elle n'en est pas moins critiquée sur les plans théorique et empirique (Steinert et Leifer 2010).

leur sein de pôles de recherche, privés donc, qui sont plus ou moins en collaboration avec la recherche académique. C'est alors en mobilisant les résultats obtenus par leurs propres chercheurs, eux-mêmes potentiellement initiés aux discours portés par leur entreprise, que le récit de la promesse se tisse. Ce phénomène s'illustre parfaitement dans le domaine de l'IA où, depuis 2022 au moins, les firmes comme OpenAI, Meta ou Google sont en production continue d'annonces basées sur leurs innovations technologiques[18]. De façon plus générale, en France, le crédit d'impôt recherche, mis en place en 2004, vise justement à favoriser l'innovation dans les entreprises et donc à positionner l'Etat comme un investisseur.

Un modèle de diffusion des promesses à étoffer

F. Lussier-Lejeune entrevoit la diffusion des promesses selon un modèle original hérité du traitement du signal : une promesse est émise d'un côté, reçue de l'autre, avec, entre deux, des mécanismes d'amplification ou de distorsion. L'énonciation d'un discours technoscientifique, dont le contenu peut être intégré à un récit (émission), est diffusée de sorte à générer des investissements dans ce sur quoi porte la promesse (réception). Les acteurs peuvent contribuer à chacun de ces « pôles », de façon plus ou moins insistante pour participer à son amplification, via une présence importante dans les médias, la constitution de projets (inter)nationaux, des coalitions d'acteurs.

Malgré tout, et F. Lussier-Lejeune l'a noté, l'analyse fait « comme si les promesses agissaient exclusivement comme un mécanisme unidirectionnel et intentionnel entre acteurs à la recherche de financement et acteurs en quête de retour sur investissement » (Lussier-Lejeune 2022:69). Ces discours se diffusent pourtant au-delà des acteurs susmentionnés, et dans plusieurs sens. Sur le plan analytique, considérer les promesses selon un modèle ondulatoire a une vertu : au-delà de leurs récepteurs, les promesses continuent leur chemin au sein du monde social. Elles se retrouvent, plus ou moins fidèlement aux énoncés originels, dans les conversations, les projets. Elles sont discutées lors de réunions de travail, de comités de quartier. Elles deviennent un récit standard et orthodoxe, validé ou combattu selon les communautés. Autrement dit, même si certains acteurs ne participent pas à la constitution de la promesse générale, ils sont malgré tout affectés par elles et peuvent, localement, la transposer, la transformer, la réutiliser.

Des promesses qui se propagent

Peut-on, dès lors, qualifier la façon dont elles se diffusent au sein de ce milieu ? Un tel questionnement rejoint l'ambition de l'ouvrage de D. Boullier, *Propagations* (2023), d'une étude des phénomènes sociaux par l'examen de leur traces. Tout comme les virus, les rumeurs ou les innovations (exemples traités par l'auteur), les promesses laissent des traces qui révèlent leur cheminement dans le monde social. D. Boullier suggère dans son livre l'émergence « d'un nouveau paradigme pour les sciences sociales » (c'est le sous-titre), celui des propagations, qui ajoute un nouveau point de vue – complémentaire aux précédents – sur le social.

[18] Fin 2024 par exemple, OpenAI a repris le principe d'un mini-calendrier de l'Avent en proposant les « 12 jours d'OpenAI », où, chaque jour, étaient présentées de nouvelles innovations : *http://12daysofopenai.com/*.

L'approche de D. Boullier se distancie d'une approche par les « préférences individuelles », fondée sur le principe de la « rationalité limitée » des acteurs, et inspirée des travaux d'H. Simon (1955, 1982). La perspective des préférences individuelles permet de renseigner les modalités de prise de décisions des acteurs, aux prises entre leur rationalité et un point de vue nécessairement situé. Dans le cas des promesses, cette approche manque sa cible en ne permettant pas de considérer la diffusion à grande échelle des discours selon une échelle d'analyse plus macroscopique. C'est tout l'intérêt de l'approche par les propagations, qui investigue justement les dynamiques de diffusion des discours par la trace, le signal, c'est-à-dire par le contenu, les références, que l'on peut trouver notamment chez les acteurs.

Pour D. Boullier, il est primordial de s'intéresser à la matérialité de ces traces pour reconstituer leur évolution sur le plan culturel. Rapports de projet, publicités, tweets, films, discours sont autant de formes différentes à partir desquelles on peut envisager une histoire des promesses. C'est un chantier titanesque que nous n'avons pas la prétention d'avoir conduit en intégralité, nous en donnerons seulement quelques extraits choisis. Le chapitre II, quant à lui, se focalisera sur l'instrumentalisation de ces promesses par des acteurs industriels à l'échelle des salariés de l'industrie, au-delà de leur réception médiatique.

Rapide point méthodologique : le spectre de l'IA générative

Au moment de la réalisation des enquêtes présentées dans la thèse, les projets de déploiement d'IA générative sont rares, et les plus avancés encore balbutiants. C'est pourquoi, à moins que cela ne soit justifié, nous ne mobiliserons pas la littérature (encore naissante) qui investigue l'IA générative dans les organisations pour la mettre en regard, toutes choses égales par ailleurs, avec nos propres observations.

Dans le même temps, le regain d'intérêt de l'IA *en général* dans le débat médiatique est précisément associé à ce surgissement de l'IA générative dans la vie sociale. Devrait-on alors séparer les discours qui parlent de l'IA générative (peu pertinents pour nous en théorie) et ceux qui parlent d'IA non générative ? En réalité, ça n'est pas possible. Les discours médiatique et public sur l'IA confondent généralement les approches de l'IA de façon indistincte. Des grandes promesses portant sur l'IA générative peuvent simplement mentionner le terme « IA », et ainsi donner l'impression qu'elles portent sur l'ensemble de ces technologies. Il nous paraît dès lors pertinent de s'intéresser à tous les propos dès lors qu'ils mentionnent l'IA, et non pas seulement ceux qui ne porteraient que sur de l'IA non générative.

Propos du chapitre et plan

Dans ce chapitre, nous chercherons à présenter les promesses de l'IA dans le monde industriel en montrant que coexistent en fait deux sphères de promesses qui s'alimentent entre elles. Au lieu de se juxtaposer, ces deux « répertoires » (Joly 2015) – celui de l'IA d'un côté, du renouveau de l'industrie de l'autre – se nourrissent l'un de l'autre pour façonner la promesse de l'industrie du futur. Nous étudierons dans ce chapitre l'IA et l'*Industrie 4.0* comme objets de discours, en ayant recours aussi bien à des sources primaires qu'à une littérature relative à l'analyse critique de discours (Maingueneau 2012). Cette analyse constituera un préalable à l'examen de la réception de ces promesses par les acteurs de l'industrie dans le chapitre suivant.

Nous nous intéresserons d'abord à la forme des promesses (1), en allant sur le terrain du registre discursif, de sorte à montrer qu'elles sont construites sur le mode du déterminisme justificatoire (1.a).

Nous montrerons ensuite comment le pôle émetteur des promesses de l'IA s'est structuré autour d'effets d'annonce (1.b) et comment le discours de la quatrième révolution industrielle s'en est nourri par la suite (1.c). Ces éléments préliminaires nous permettront de relever les promesses qui concernent la nature des changements à venir dans le monde industriel, en mettant en lumière le rapport à la temporalité emprunté par le récit de *l'Industrie 4.0 (*1.d).

Une deuxième partie sera consacrée au contenu des promesses (2), au travers de trois thématiques concourantes. Nous évoquerons d'abord le mythe de l'efficacité et de l'objectivité des systèmes d'IA en mettant en valeur la tension entre anthropomorphisation et déshumanisation de ces systèmes techniques (2.a). La sous-section suivante sera consacrée à la promesse d'essor économique associée à l'IA dans l'industrie, à partir de laquelle nous relèverons la dimension proprement capitaliste de l'IA (2.b). Nous terminerons en évoquant la question du travail et des annonces divergentes sur son évolution face à la transformation numérique des organisations (2.c).

Nous conclurons le chapitre en mettant en avant le rôle de l'industrie du semiconducteur dans la fabrication de l'imaginaire numérique associé à l'IA (3). Une première section introduira les enjeux économiques et géopolitiques liés à la conception et la production des semiconducteurs en mettant en avant sa dimension stratégique (0). Nous montrerons par la suite comment elle participe activement à sa propre promotion au travers celle de l'IA (3.b), en alimentant notamment la promesse économique au travers de projets industriels européens (3.c).

1. Circulation des récits entre intelligence artificielle et industrie

Les promesses n'engagent-elles que ceux qui les écoutent ? L'adage et ses variantes, devenu populaire, revient cycliquement dans le champ politique du XXème siècle. Pourtant, au-delà de la politique électorale, les promesses, et notamment les promesses technoscientifiques, sont bel et bien des outils et des marques d'engagement, qui permettent à ceux qui les formulent de se positionner, et de participer à les faire advenir. Dans cette section, nous chercherons à montrer en quoi les promesses technoscientifiques, et en particulier celles qui concernent l'IA et l'industrie sont, au-delà des récits qu'elles véhiculent, des instruments de mobilisation des acteurs. Il s'agira d'abord de caractériser ce récit en soulignant son caractère déterministe (1.a). Fort de ce constat, nous montrerons en quoi le champ de l'IA s'est construit autour de tels effets d'annonce (1.b) puis nous verrons comment ceux-ci ont par la suite alimenté les récits du renouveau industriel, de sorte à se consolider les uns et les autres (1.c). Nous verrons enfin comment ce processus de mise en récit aboutit à véhiculer un rapport au temps particulier, dénotant d'une certaine d'urgence, dans l'objectif d'embarquer les acteurs économiques concernés (1.d).

1.a. La promesse comme expression du registre déterministe

Déterminisme technique, constructivisme social

Quand il s'agit du futur de l'emploi, l'emploi du futur est récurrent. Nous l'avons vu en introduction de ce chapitre au travers de la transcription des discours de nos intervenants. Pourtant, de telles anticipations mériteraient probablement un conditionnel. Elles illustrent une vision foncièrement déterministe qui se passe de preuves : *l'IA va être introduite dans les organisations, le travail va changer, et voici en quoi*. Dans son acception générale, ce « déterminisme technologique » désigne un type de discours sur les technologies, qui énonce que celles-ci, au travers de leurs évolutions, ont des effets sur la société (MacKenzie & Wajcman, 1999). Cette position peut au premier abord paraître comme allant de soi. Les moyens de production, de communication, de transport ne sont pas les mêmes aujourd'hui qu'il y a un ou dix siècles, et nous vivons bien différemment de nos ancêtres. Mais il faut creuser, et la critique se positionne justement sur le lien de causalité entre les systèmes techniques et le mode de fonctionnement de la société dans laquelle ils s'inscrivent. Dire que les technologies façonnent le tissu économique et social revient à leur donner une prépondérance, une agentivité, tout du moins un pouvoir causal.

Au contraire, les tenants du constructivisme social, T. Pinch et W. Bijker (1984) en tête, expliquent que les technologies sont conçues dans un contexte social particulier et qu'il est nécessaire de l'appréhender pour mieux comprendre leurs évolutions. En se plaçant dans le sillage du programme fort de D. Bloor (1980) en sociologie des sciences, ces auteurs reprennent son principe de symétrie qui stipule que la véracité d'une croyance donnée ne devrait pas entrer en ligne de compte lorsqu'il s'agit d'évaluer ce qui porte à croire. Ce principe amène les sociologues des sciences à envisager la connaissance comme socialement construite. Si ce n'est pas la vérité qui justifie la croyance, en effet, c'est bien que des régimes de valeurs et de normes, autrement dit des facteurs culturels et sociaux, y contribuent. Cet apport méthodologique est majeur, notent T. Pinch et W. Bijker, car il autorise à concevoir d'autres construits sociaux, en particulier la technologie. Dans leur propre champ (la sociologie des technologies), ils réinterprètent le principe de symétrie de D. Bloor. Ils estiment que le bon fonctionnement d'un artefact technique ne devrait pas entrer en compte dans l'évaluation de son succès. Au fond, ce qui devrait être expliqué, c'est précisément le succès d'une innovation technique, en s'intéressant aux facteurs sociaux qui y contribuent[19].

Le succès de cette critique du déterminisme a forcé certains tenants de cette position à intégrer des éléments constructivistes dans leur posture. Dans sa tentative de réhabilitation du déterminisme technologique comme posture théorique légitime, A. Dafoe (aujourd'hui directeur chez Google), souligne par exemple la nécessité d'intégrer les enjeux militaro-économiques dans le cadrage des évolutions sociales liées aux technologies (Dafoe 2015). Selon lui, les contraintes et la compétition qu'elle engendre, déterminent l'innovation. C'est un moyen, pour A. Dafoe, de réconcilier des micro-processus sociaux et

[19] S. Wyatt (2008), dont nous évoquerons le travail par la suite, se montre quelque peu critique de cette approche qui consiste à distinguer absolument « succès » dans le monde social et « bon fonctionnement » dans le monde technique. Elle considère qu'il s'agit de deux mondes entremêlés et que, d'autre part, la causalité est intéressante à analyser dans les deux sens.

des macro-processus déterministes[20]. Pourtant, l'idée d'un continuum entre constructivisme social et déterminisme technologique semble ne pas tenir. Un déterminisme « doux » attaché à montrer que les technologies influencent la société, apparaît trivial, tandis qu'un déterminisme « dur », qui voudrait démontrer l'autonomie du développement technique et sa totale hégémonie sur la réalité, est difficile à défendre (Vogrin 2022). La question, comme le souligne M. Vogrin, n'est plus de se demander si les systèmes techniques déterminent la société, mais plutôt comment.

Débusquer le déterminisme justificatoire

Le renversement de causalité opéré par les constructivistes reste essentiellement cantonné à la littérature en SHS, où le débat conceptuel est alimenté par des observations empiriques [21]. Le déterminisme technologique tel que celui entendu à la conférence évoquée en préambule est profondément ancré dans les discours sur les technologies, aussi bien au niveau des états que des entreprises.

Ce déterminisme en tant que discours et qu'outil rhétorique, est théoriquement et implicitement inspiré du déterminisme en tant que théorie. Pour S. Wyatt, il s'agit d'une forme particulière de déterminisme, un « déterminisme justificatoire », qui « est tout autour de nous. C'est le type de déterminisme technologique utilisé par les employeurs pour justifier des réductions d'effectifs et des réorganisations[22] » (Wyatt, 2008, p. 174). Employé comme un instrument rhétorique (plutôt que théorique), le déterminisme justificatoire déguise un futur plausible en un futur certain, en donnant un rôle prépondérant aux innovations technologiques dans les changements estimés.

S. Wyatt le différencie par exemple du « déterminisme normatif » qui conçoit une forme d'autonomie des technologies, en leur prêtant un pouvoir transformatif direct sur le monde, et que l'on retrouve chez des auteurs comme J. Ellul (1990). Le déterminisme justificatoire n'est pas seulement le moyen de prédire le futur et d'embarquer un public dans un récit bien rodé, c'est-à-dire de formuler une promesse inconséquente. Tout son intérêt se révèle dans sa capacité, d'un point de vue marchand, à rallier des acteurs et à mobiliser des investisseurs. Comme l'écrivent M. Colleret et M. Khelfaoui, qui étudient le cas des promoteurs des nanotechnologies et de l'IA au Québec, « c'est en voulant imposer leur vision du futur qu'ils cherchent à contrôler et à orienter les actions du présent » (2021:180). Le déterminisme justificatoire fait prendre corps à la prédiction qu'il porte en son sein, et c'est en cela qu'il ébauche les « prophéties auto-réalisatrices »[23] déjà évoquées par R. Merton (1948). En créant l'urgence, la nécessité, les acteurs qui s'emparent de ces discours cherchent à rendre le sujet incontournable, puis à se rendre eux-mêmes incontournables.

---

[20] En un sens, A. Dafoe explique ici le déterminisme technologique (comme résultat) par une épistémologie socialement déterministe.

[21] L'argument est également défendu par certaines organisations syndicales (FO-Cadres, 2023, p. 4).

[22] « Justificatory technological determinism is deployed largely by actors. It is all around us. It is the type of technological determinism used by employers to justify downsizing and reorganization » (notre traduction).

[23] L. Arena, G. Gaglio et J.-S. Vayre (2022) ont montré comment, en radiologie, les annonces de remplacement des radiologues par des systèmes d'IA par Geoffrey Hinton, l'un des pionniers de l'apprentissage profond, ont mené à une baisse d'attractivité de la discipline. Face à ce déclassement de l'activité, de nombreux radiologues ont recours à l'IA pour compenser le non-remplacement de collègues, réalisant ainsi la prophétie en dépit d'un manque de qualité de l'offre algorithmique existante.

Le déterminisme dans la presse : des récits performatifs

Ne peut-on pas voir une forme de succès de la posture déterministe dans l'envahissement de ces thématiques dans le débat public ? Peu de systèmes techniques peuvent tout à la fois se targuer d'avoir un règlement européen à leur nom (Union Européenne 2024), d'être l'objet d'une journée spéciale d'un grand média public (France Inter, (Guédot 2023)), et de figurer sur un tag urbain, voir (Figure 5).



Figure 5 : Photographie prise par l'auteur (de la thèse, pas du tag !) un matin de mai 2024.

L'un des intervenants de Nvidia, dans une posture visiblement réflexive, s'exclame par exemple : « Vous avez pas fini d'en entendre parler de l'IA », avant d'ajouter : « Tous les jours dans les médias on en parle. » Cette présence médiatique remarquée[24] est caractérisée par des témoignages ambivalents. Une étude réalisée auprès de deux grands journaux allemands montre que le ton employé par les journalistes peut être qualifié de « semi-déterministe », c'est-à-dire qu'il mêle assertions déterministes aussi bien d'un point de vue technologique que social, et que « l'importance sociale de l'IA tend à [y] être présupposée en raison de ses intérêts pour la vie de tous les jours[25] » (Winkel, 2024, p. 8).

Par une boucle de rétroaction positive, les médias mettent en avant une technologie vue comme transformatrice ce qui lui vaut, par suite, d'être perçue comme telle, alimentant de fait un engouement auto-perpétuateur. Si « tous les jours […] on en parle », c'est aussi parce que certains acteurs cherchent à en parler : l'énoncé participe à sa propre validation. Voilà une illustration parfaite d'un langage performatif au sens de J. Austin (1975). La performativité n'est pas propre aux promesses, pointerait D. Boullier (2023:153-54) : « Du point de vue des propagations aussi, tous les énoncés sont performatifs au sens qu'ils sont candidats à leur reproduction, à leur réplication, à des répliques, à des variations, à des critiques, etc. Et cela même en dehors de l'environnement numérique contemporain où chacun peut mesurer le poids réputationnel de chacun de ses tweets par exemple, puisqu'il dispose d'une trace calculée des effets de son énoncé sur le monde. ». Dans le cas des promesses technoscientifiques, il

[24] Comme l'ont montré A. Bellon et J. Velkovska (2023) au travers d'une revue exhaustive d'articles de la presse française (plus de 35 000) parus entre 2000 et 2019, le traitement médiatique de l'IA convoque essentiellement des hommes, scientifiques (Cédric Villani), parfois affiliés à des géants du numérique (Yann Le Cun, Geoffrey Hinton) mais aussi à des mouvements de pensée techno-catastrophistes (Nick Bostrom, Ray Kurzweil : nous aurons l'occasion d'y revenir). Quand ces spécialistes sont amenés à parler d'éthique ou de sciences sociales, ce n'est qu'avec une double casquette d'informaticien ou de roboticienne (Raja Chatila, Jean-Gabriel Ganascia, Laurence Devillers)

[25] « The social importance of AI tends to be predetermined due to its usefulness for everyday interests.» (notre traduction).

existe une volonté de construction d'un projet économique porté par une multitude d'acteurs. M. Winkel note justement qu'un autre champ de paramètres, cette fois-ci économiques, sont évoqués par les médias. Ces derniers donnent une place importante aux acteurs économiques (et notamment aux entreprises) dans le développement de l'IA, tout en ayant des difficultés à estimer si ces acteurs agissent de façon intentionnelle ou simplement selon les contraintes exercées par l'économie de marché – l'auteur parle d'une forme de « déterminisme techno-capitaliste » (Winkel 2024).

Le déterminisme justificatoire est l'un des moyens discursifs, pour les promoteurs des technologies d'IA[26], de faire le pont entre deux caractéristiques contradictoires des promesses technoscientifiques : la radicalité de la nouveauté promise, et la crédibilité de cette innovation (Joly 2015). Cette contradiction résulte d'une difficulté à pouvoir attester de l'utilité, de l'efficacité, de la fiabilité d'une technologie qui se trouve être, en principe, si différente de ce qui est déjà connu.

Un déterminisme indéterminé

Revenons à notre conférence inaugurale. Un ingénieur-docteur de Neovision vient de prendre la suite de son dirigeant pour présenter un projet fort intéressant de système d'IA pour la détection de problème qualité dans l'industrie du semiconducteur[27]. Pédagogue, le jeune homme explique que le dispositif a été développé en moins de six mois et est désormais opérationnel. Alors que l'exposé se termine, je ne peux m'empêcher de poser la question qui me brûle le bout des lèvres : des changements ont-ils été observés dans les routines de travail des techniciens qui utilisent le système ? En intégrant, *a posteriori*, cette anecdote dans notre réflexion, on pourrait dire que l'interrogation sous-jacente était aussi : *les hypothèses déterministes que vous présentez se sont-elles vérifiées* ?

La réponse est hésitante : on me répond qu'il y a peu de vision, sur place, des changements opérés par les déploiements de solutions d'IA, il est donc difficile de donner une réponse précise. Le PDG reprend le micro en affirmant que l'objectif est de passer de tâches visuelles et manuelles vers des tâches automatisées, dans l'idée que les salariés puissent passer moins de temps pour chaque cas repéré. Pas de vérification, donc. Cette interaction tout à fait banale souligne le caractère prospectif de changements hypothétiques, peut-être espérés, qui ne sont pas sous-tendus par des preuves empiriques. Les changements promis par le PDG de Neovision à l'échelle de la société (*les métiers vont changer*) sont en fait les objectifs auxquels son entreprise tente elle-même, à son échelle, de contribuer par son action.

Le déterminisme justificatoire n'est pas seulement porté sur l'IA, ou sur des technologies, il concerne plus largement les processus d'innovation (qu'ils soient organisationnels, politiques, techniques) rattachés à des actions collectives, publiques comme privées. C'est un support discursif de la promesse technoscientifique, un moyen de la diffuser, qui est mis à profit pour mobiliser les acteurs.

[26] Une étude du Reuters Institute for the Study of Journalism montre que les experts interrogés sur l'IA dans les médias britanniques sont essentiellement des industriels (Brennen, Howard, et Nielsen 2018), d'où un cadrage très orienté des problématiques et enjeux présentés (qui laissent largement de côté les questions environnementales par exemple).

[27] La coïncidence est amusante puisque ce sont des projets très similaires que nous avons pu observer lors de notre étude de terrain.

Industrie 4.0 et déterminisme

L'industrie a tout particulièrement été l'objet de promesses empreintes d'une nuance déterministe depuis les années 2010. La « Quatrième Révolution Industrielle » est l'un des thèmes majeurs du Forum économique mondial de 2016, qui se tient chaque année à Davos. Il est l'occasion pour K. Schwab, son fondateur et président, de présenter la thèse qu'il défend dans son livre éponyme : l'industrie est en train de subir une disruption d'une ampleur considérable, à une vitesse sans précédent et de façon systémique (Schwab [2016] 2017). Ces changements importants sont liés, pour lui, à une convergence technologique qui voit de nombreux systèmes technologiques complexes et variés atteindre leur maturité. Ils doivent permettre d'automatiser les processus industriels à grande échelle. « En inaugurant l'"usine intelligente", » écrit K. Schwab ([2016] 2017:19), « la Quatrième Révolution Industrielle crée un monde où les systèmes virtuels et physiques de production du monde entier coopéreront de manière flexible : on pourra ainsi personnaliser intégralement les produits et créer de nouveaux modèles de fonctionnement. » L'accent déterministe est très prononcé, et sert ici une description du réel souhaitable, plutôt qu'existant ; nous développerons cette idée dans les prochaines sections.

Le livre de K. Schwab est très influent[28]. On dénombre plus de 20 000 citations sur Google Scholar. Dans le domaine du discours déterministe, ce court ouvrage est exemplaire d'inventivité. Donnons un exemple. Les pages 38-39 sont constituées d'un tableau présentant les résultats d'un sondage réalisé pour le compte du Forum économique mondial (2015). Les huit cent sondés sont des dirigeants et des experts du monde des technologies de l'information et de la communication. Il n'y a pas plus d'informations données sur eux. Pour chacune des propositions qui leur étaient présentées, les experts devaient dire à partir de quelle année, à leur avis, elle serait réalisée. Les sondeurs ont ensuite agrégé les résultats pour donner le taux de réponses affirmatives à l'année 2025, soit dix ans plus tard. Par exemple, l'une des propositions est la suivante : « 10% des lunettes de vue sont connectées à Internet », et 85,5% des sondés ont considéré que cette proposition serait vraie en 2025 au plus tard. Si le sondage initial se présente bien comme étant un recueil d'attentes, à la teneur prédictive, K. Schwab se sert ensuite de ces résultats pour affirmer que les « points de bascule [identifiés] signalent les changements systémiques majeurs à venir et indiquent les meilleurs moyens de s'y préparer. » (p. 39). Les experts consultés connaissent bien les technologies sur le plan technique, mais sont-ils nécessairement habilités à qualifier leur adoption ?

L'exemple des lunettes est parlant. En 2012, les Google Glass font couler beaucoup d'encre, mais peu de liquide : face au désintérêt du public, Google abandonne le marché des particuliers dès 2015 pour ne se consacrer qu'aux entreprises, pour des usages sporadiques. Outre la faible puissance de calcul alors embarquée dans ces lunettes, elles suscitent également la désagréable impression que leurs porteurs peuvent filmer leur environnement et leurs interlocuteurs, ce qui déplaît à l'opinion publique. Mais l'un des facteurs de rejet concerne ironiquement la désillusion liée à ces lunettes : nombre de consommateurs, excités par l'imaginaire d'une vision en réalité augmentée (jamais explicitement promise par Google mais

[28] Il est à noter que K. Schwab est au centre de théories conspirationnistes (pour certaines portant un fort relent antisémite) qui l'accusent de vouloir assurer, sous couvert de projets mondialisés comme le « *Great Reset* » (le Grand Recommencement, titre de l'un de ses ouvrages), la domination d'une caste d'élites « globalistes » sur la population (Matuszewski, Rams-Ługowski, et Pawłowski 2024). Ce n'est bien entendu pas au sens de ces attaques discriminatoires et condamnables, que doit être pensé l'usage du terme « influence » ici.

stimulée dans les médias), sont déçus une fois l'objet fini sur leur nez (Bouchet 2021). En 2023, rebelote, à la suite de l'engouement suscité par le métavers, Meta et Ray-Ban collaborent autour d'un dispositif de lunettes connectées, mais ne parviennent à vendre que 300 000 exemplaires dans le monde (Marin 2023). Il ne suffit pas de dire que la prédiction ne s'est pas réalisée pour la discréditer et la balayer. L'erreur d'appréciation, même collective, n'est pas nécessairement une faute. Pour autant, l'usage d'un argument d'autorité en invoquant les prédictions de prétendus experts interroge sur la capacité à statuer sur un futur technologique qui serait déjà écrit.

Dans le même temps, K. Schwab donne une forme d'agentivité à cet arsenal technologique et organisationnel. Dans une interview pour la chaîne étasunienne CNN Business, et alors que le présentateur remarque : « Mais le truc avec votre quatrième révolution [industrielle], c'est qu'elle est en train de se produire et que l'on ne peut pas l'arrêter… La question est donc de savoir comment la gérer. », K. Schwab répond : « Exactement, et c'est la raison pour laquelle j'ai essayé de fournir un cadre sous la forme d'un livre pour chaque participant [du Forum économique mondial de 2016], et c'est pourquoi j'espère qu'au travers d'interactions public-privé nous pourrons créer les règles, les normes, etc. nécessaires pour maîtriser cette révolution[29]. » De son point de vue, les changements provoqués par l'irruption de nouvelles technologies sont ainsi à maîtriser, à apprivoiser : ils arrivent, et doivent être pris en compte par les acteurs[30], comme si ceux-ci étaient étrangers à leur survenue. En cadrant ainsi le débat, K. Schwab amorce la réflexion autour du déploiement technologique selon ses propres termes et sa propre vision, dans l'idée d'agglomérer les acteurs publics et privés autour de celle-ci[31]. Les propos de K. Schwab n'engagent que lui, mais sa posture de président du Forum économique mondial et le contexte d'importante exposition permis par cet événement ont fortement contribué à diffuser ces idées (Pfeiffer 2017).

[29] « But the point with your fourth [industrial] revolution, is it's happening and we can't stop it. So it's a question of how we manage it. – Exactly and that's the reason why I tried to provide a framework in the form of a book for each participant, and why I hope that through public-private interactions we create the necessary rules, norms and so on, to master this revolution. » (nos transcription et traduction, voir sur Youtube : https://www.youtube.com/watch?v=oQBKPIrY9Po&t=24s)

[30] Selon C. Perez et T. Leach, même si l'interprétation aveugle du discours schwabien de la 4ème révolution industrielle mène à une perspective déterministe, Schwab lui-même n'y souscrirait pas (2022, p. 37). Schwab dans son appel à agir, sous-tend une possibilité pour les acteurs économiques de manœuvrer les transformations en cours, de leur attribuer une « directionnalité » qui orienterait les changements des organisations. Nous estimons que cette réflexion n'est pas incohérente avec la distinction entre déterminisme en tant que posture théorique et en tant que posture rhétorique, puisque K. Schwab fait appel à des éléments du déterminisme justificatoire pour élaborer sa vision.

[31] Cette position est assumée par K. Schwab, dont l'un des objectifs est de « créer une plateforme qui suscite la coopération et les partenariats public-privé autour de questions liées à la révolution technologique » ([2016] 2017:14).

1.b. IA et promesse technoscientifique

Une promesse en négatif

En mars 2023, le *Future of Life Institute* publie une lettre ouverte surprenante (Future of Life Institute 2023). Son titre est clair : « *Pause Giant AI Experiments: An Open Letter* », il faut mettre en pause le développement des modèles d'IA. Le ton se veut grave : de grands dangers pèseraient sur la société, et même l'humanité tout entière, à cause de la menace que représenteraient les futurs modèles d'IA dotée d'une intelligence comparable à celles des humains. Parmi les signataires de la lettre figurent des noms bien connus du domaine : Elon Musk (entrepreneur qui a co-fondé OpenAI avec Sam Altman, mais l'avait déjà quittée depuis plusieurs années au moment de la publication de la lettre, conseiller temporaire de Donald Trump à la Maison Blanche), Yoshua Bengio (chercheur français en IA, co-lauréat avec Yann Le Cun et Geoffrey Hinton[32] du prix Turing en 2018) ou encore Steve Wozniak (co-fondateur d'Apple).

Dans un billet de blog acide, H. Erz (2023) s'interroge : les magnats de l'IA se seraient-ils finalement acheté une conscience ? La réponse semble être négative. Pour l'expliquer, il est nécessaire de se pencher sur ce que représentent les dangers supposés de l'IA dans cette lettre. Les préoccupations présentées sont exprimées au travers de quatre questions liées à la (1) propagation de la désinformation, (2) l'automatisation de *tous* les métiers, (3) l'émergence d'entités conscientes non-humaines qui viendraient à surpasser en nombre, et en intelligence les êtres humains, et (4) la destruction pure et simple de notre civilisation. Le programme est peu reluisant, chaque question supplémentaire alignant un pas de plus vers une catastrophe mondiale. Pour les auteurs, il est nécessaire de prendre le temps de la réflexion, et de réguler l'IA.

Le contenu de cette lettre été fortement critiqué pour son positionnement idéologique typique du mouvement protéiforme TESCREAL[33], prégnant dans la Silicon Valley (Gebru et Torres 2024). Malgré sa portée internationale, le nombre de signataires est resté limité. Mais le but était-il vraiment de convaincre ? Pour ce qui concerne la régulation de l'IA à l'échelle internationale, la réponse n'est probablement pas binaire, si l'on en croit le journaliste T. Prévost (2025). Celui-ci relate les ingérences des grands groupes de l'IA dans l'élaboration de l'encadrement de l'IA. Les risques dit « existentiels », incarnés par la lettre, dénoncés par les acteurs de l'industrie de l'IA eux-mêmes, permettraient de leur octroyer une légitimité et une place de choix dans ces débats. T. Prévost dénonce un processus de « capture réglementaire »[34], mis en œuvre au Royaume-Uni, aux Etats-Unis et dans l'Union Européenne,

[32] G. Hinton a été nommé prix Nobel de Physique 2024 pour ses travaux sur les réseaux de neurones artificiels, non sans susciter une certaine controverse vis-à-vis de ses positions catastrophistes (*doomerism*) sur l'IA (Heaven 2024).

[33] L'acronyme, suggéré par T. Gebru et E. Torres, dénombre une succession de mouvements intellectuels et peut se traduire en français par : Transhumanisme, Extropianisme, Singularitarisme, Cosmisme, Rationalisme, Altruisme Efficace, Long-termisme. Les deux auteurs considèrent ces courants idéologiques comme formant la « nouvelle vague de l'eugénisme », laquelle donne à l'IA (et la technologie en général) un rôle prépondérant dans le futur de l'humanité (que ce soit pour son plus grand bien, ou comme une cause de son déclin). On compte parmi les penseurs les plus influents de ces mouvements N. Bostrom, M. Tegmark (directeur du *Future of Life Institute* qui a diffusé la lettre), R. Kurzweil ou encore W. MacAskill.

[34] A ce sujet, voir aussi (Metcalf 2025) qui aborde la question sous l'angle de la sécurité de l'IA (*AI safety*).

qui revient à abandonner plus ou moins partiellement la régulation d'un secteur économique à ses acteurs eux-mêmes, de sorte qu'ils puissent se soustraire à la concurrence et au joug des états.

Il n'est pas possible de trancher les intentions exactes des signataires de cette lettre, d'autant qu'elles sont probablement multiples et hétéroclites. Ce que l'on peut affirmer, toutefois, c'est qu'elle est porteuse d'une promesse sous une forme inattendue. Si la crainte peut émerger des esprits du citoyen inquiet et de la salariée soucieuse, d'autres peuvent au contraire y voir une opportunité. Ces systèmes d'IA, annoncés comme si efficaces, recèleraient de possibilités innombrables, qu'elles soient techniques, ou économiques. Difficile de ne pas voir une publicité déguisée (qu'elle soit consciente ou pas[35]) pour OpenAI, l'entreprise à l'origine de ChatGPT, quand le résumé succinct de la lettre appelle textuellement à ne pas entraîner de systèmes « plus puissant que GPT-4 », le modèle de langage qui lui est associé. Peu importe que l'avènement d'une IA générale soit au mieux une hypothèse plausible – il n'en existe aucune preuve ou modélisation formelle (Ganascia 2019) – les discours, combinés dans la lettre, d'entrepreneurs du numérique, de chercheurs en IA, de philosophes reconnus, d'ingénieurs de bonne foi participent à catalyser cette impression d'incontrôle, d'une technologie dont l'humanité perdrait la maîtrise. Nous ne prétendons pas que cette lettre ouverte a eu des effets significatifs sur les représentations de l'IA[36], mais souhaitons montrer que derrière l'alerte se cache en réalité, en négatif, une promesse : *il sera possible de faire tant de choses avec l'IA*. Le travail de N. Weiss-Blatt (2023) publié sur son blog *AI Panic* montre justement comment optimisme et catastrophisme au sujet de l'IA se rejoignent sur le plan idéologique mais aussi sur le plan économique (*panic as a business*). La critique de l'IA sous-jacente au discours d'alerte apocalyptique, typique de ce que L. Vinsel appelle la « criti-hype » (2021), n'est pas une critique opérante, du moins ne cherche-t-elle pas nécessairement à l'être[37]. C'est une critique en forme de promesse[38].

En prenant le soin de définir ce que sont les dangers que représentent les systèmes d'IA et en suggérant de réguler pour les éviter, la lettre définit un cadrage qui passe sciemment sous silence tout un autre ensemble de risques, ou au mieux les diminue[39]. Dans une revue d'articles de presse britanniques et étasuniens, M. Crépel et D. Cardon (2022) observent ainsi une nette disjonction entre (1) une critique sociale ancrée dans le présent et (2) un récit prophétique, qui se projette dans le temps long. La stratégie

---

35 Rappelons qu'Elon Musk a quitté OpenAI en 2018 suite à des désaccords stratégiques et que cette pause ciblée sur OpenAI pouvait aussi être un moyen pour lui de se positionner contre la structure (Manens 2023). Quelques mois seulement après la diffusion de la lettre, il crée et finance massivement une nouvelle entreprise, xAI, dont le but est de concurrencer OpenAI (Hart 2024).

36 Une revue partielle des (nombreux) articles de presse sur le sujet les jours suivants la publication de la lettre montre malgré tout que c'est bien le ton imposé par celle-ci qui a guidé la communication médiatique, avec peu d'espace laissé à la critique.

37 En dépit de cette analyse critique globale, il serait maladroit d'essentialiser l'ensemble des individus qui font valoir ce type d'arguments. Des personnes peuvent tout à fait être convaincues du bien-fondé d'une démarche qui voudrait préserver l'humanité de risques jugés conséquents et s'engager dans une critique de la technique, voir par exemple le mouvement *Pause IA*.

38 Les études qui portent sur la tonalité des discours (voir par exemple (Gourlet, Ricci, et Crépel 2024), qui propose une méthode de recherche participative innovante) sont éclairantes du point de vue du traitement médiatique de l'IA. Cependant, la distinction méthodologique des discours selon une matrice positif / négatif peut faire manquer la subtilité d'une critique qui voudrait en réalité promouvoir certaines technologies.

39 « L'argument de la distraction » présenté ici fait aussi l'objet d'une critique, lire à ce propos le travail de T. Swoboda et ses collègues – dont l'un est membres du *Future of Life Institute* – (2025:6).

discursive est assumée : dans une interview pour le magazine *Rolling Stone* (O'Neil 2023), G. Hinton (co-lauréat du prix Turing 2018) affirme : « Je crois que la possibilité qu'une intelligence numérique devienne plus intelligente que les humains et nous remplace en tant qu'intelligence suprême est une menace plus sérieuse pour l'humanité que les biais et les discriminations, bien qu'il y ait des biais et de la discrimination et qu'ils doivent être affrontés urgemment[40]. » La fin de la phrase paraît attribuer à G. Hinton une vigilance envers la dimension sociale des risques attribués à l'IA, mais l'on peut faire l'hypothèse qu'elle est essentiellement de façade. Lorsqu'il quitte Google, en 2023, pour exprimer ses doutes sur les risques que ferait courir l'IA au monde, il reprend essentiellement les arguments catastrophistes distribués dans la lettre ouverte (Viniacourt 2023). La mise en lumière de ces problématiques hypothétiques, que l'on retrouve dans les mouvements de l'altruisme efficace et du long-termisme (Gebru et Torres 2024), occupe le champ du débat critique de l'IA. Cette opération de dépolitisation fait reposer les problématiques de l'IA sur la technique elle-même plutôt que sur les acteurs qui s'en saisissent. Cette mise en lumière se produit au détriment d'autres sujets épineux, pourtant bien documentés, et pour lesquels le recours à l'IA ne fait qu'accentuer ce que produisent déjà des algorithmes distribués sur le marché[41]. Le débat sur l'emploi est quant à lui légitime, mais polarisé de façon anachronique sur la question du remplacement. Ici, la promesse catastrophiste est l'occasion d'imposer un discours et de le normaliser, pour orienter le débat public autour de cadres préformatés.

L'IA, champ de promesses

L'histoire de l'IA est faite de ces aller-retours entre période faste de promesses et déclin d'intérêt, les fameux « étés » et « hivers » de l'IA (Cardon et al. 2018), voir (Figure 6). Les auteurs de cet article de

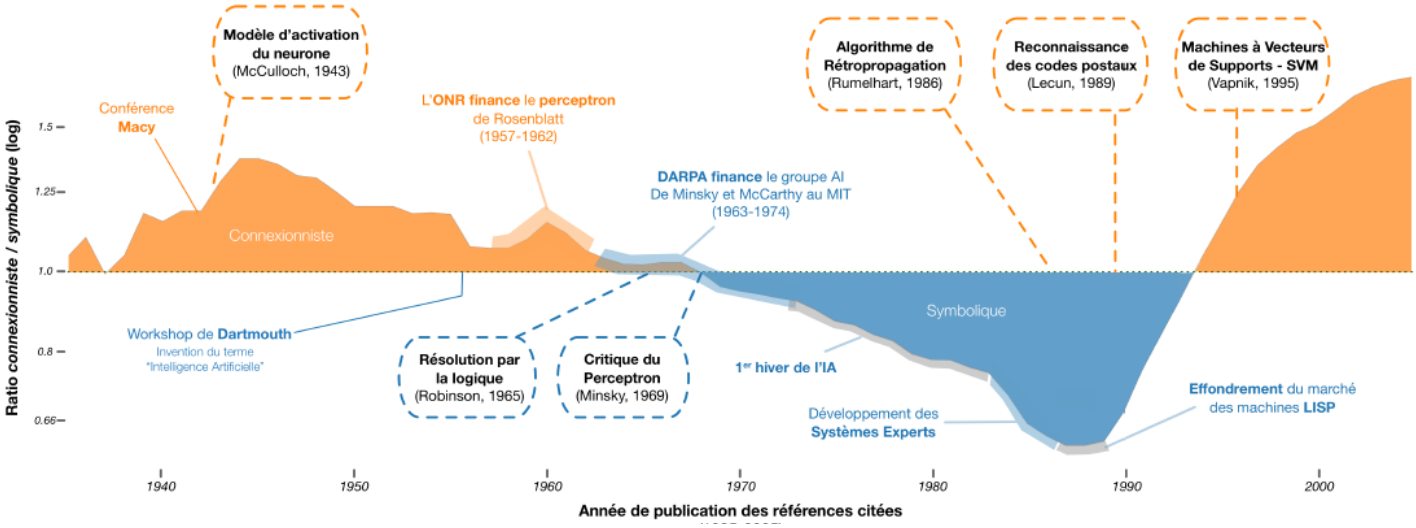


Figure 6 : Evolution du rapport entre le nombre de publications relatives au paradigme connexionniste par rapport au paradigme symbolique (échelle logarithmique). Tiré de (Cardon et al., 2018, p. 7).

[40] « I believe that the possibility that digital intelligence will become much smarter than humans and will replace us as the apex intelligence is a more serious threat to humanity than bias and discrimination, even though bias and discrimination are happening now and need to be confronted urgently » (notre traduction).

[41] Pensons à l'émergence de bulles de filtre et à la désinformation de masse comme menace pour la démocratie, à la consommation énergétique importante que ces systèmes représentent, à l'opacité d'algorithme utilisés dans le contexte de services publics. Pour ce point particulier, on peut évoquer les affaires liées aux suspensions d'allocations familiales aux Pays-Bas qui ont entraîné la démission du gouvernement néerlandais (Bertolucci 2024), ou au dispositif de prédiction de récidive étasunien COMPAS, qui discriminait les personnes noires (Beaudouin et Maxwell 2023).

référence montrent comment, tour à tour, les paradigmes symboliques et connexionnistes de l'IA ont pris le pas l'un sur l'autre dans la controverse qui les a opposés, pour s'imposer comme la *bonne manière* de faire de l'IA. Le chercheur Marvin Minsky déjà, dans les années 70, prédit que l'IA serait capable d'atteindre l'intelligence d'un individu moyen dans les trois à huit ans (Darrach 1970)[42]. Plus récemment en 2016, Geoffrey Hinton, l'un des pionniers du néo-connexionnisme que nous évoquions plus haut, a affirmé qu'il devenait inutile de former des radiologues, puisque, dans les cinq ans, les systèmes d'apprentissage profond feraient mieux que les radiologues[43]. Ces prédictions (non-réalisées[44]) sont caractéristiques d'une discipline aux ambitions démesurées fondée sur les effets d'annonce.

L'IA en tant que champ scientifique s'est elle-même construite sur la base de telles proclamations. Nous avons évoqué en introduction l'apparition de l'expression « intelligence artificielle », dans l'épisode fameux de la conférence de Dartmouth (McCarthy et al. [1955] 2006). Le texte du projet associé, dont l'objectif était de réunir des financements afin de tenir une école d'été l'année suivante, introduit le terme « *artificial intelligence* » en se fondant sur l'idée symboliste que « chaque aspect de l'apprentissage et de n'importe quelle caractéristique de l'intelligence peut en principe être décrit de façon si précise qu'une machine pourrait être conçue pour la simuler[45] ». L'hypothèse de ce projet porte au fond sur la calculabilité de la cognition humaine, de sorte que, comme l'écrit E. Favier-Baron (2023, p. 7), l'IA « réalise une hégémonie scientifique d'une approche quantitative et céphalocentrique de l'intelligence ». Loin de ne faire qu'aider à décrire le réel, les métaphores (et en particulier celles qui concernent l'IA : *intelligence*, *réseaux de neurones*) participent à façonner l'évolution des technologies (Carbonell, Sánchez-Esguevillas, et Carro 2016). J. McCarthy et les autres initiateurs du projet de recherche avaient déjà compris l'importance de réussir à valoriser leur travail de recherche au travers d'une inspiration ambitieuse et imagée. Il en résulte que l'IA en tant que discipline s'est fondée sur une promesse, celle d'une imitation, au moins fonctionnelle, de la cognition humaine. Cela explique probablement pourquoi les débats sur l'IA introduisent si souvent une comparaison entre humain et système technique. Comme l'a parfois plaisanté mon co-directeur de thèse, Thierry Ménissier, il est probable que l'imaginaire collectif n'ait pas été nourri de la même manière si sous l'acronyme « IA » se cachait l'expression « Informatique Avancée ».

Donner de la crédence aux promesses

Le rôle de la culture a été double pour donner du crédit à ces allégations. D'abord, de nombreuses œuvres fictives ont permis de donner corps à cette promesse, qui s'est épanchée dans la culture populaire,

[42] Cette remarque est partiellement controversée puisque, dans le même paragraphe, B. Darrach rapporte que Marvin Minsky aurait affirmé que « si nous avions de la chance, [les robots] nous garderaient comme des animaux de compagnie », ce que Marvin Minsky aurait nié par la suite avoir prononcé (Rose 1985).

[43] « We should stop training radiologists now. It's just completely obvious that within five years, deep learning is going to do better than radiologists. » Voir la vidéo sur YouTube : *https://www.youtube.com/watch?v=2HMPRXstSvQ*. Pour une analyse contextuelle des effets concrets de cette annonce, lire (Arena et al. 2022).

[44] Elles sont souvent ambiguës, à l'instar des comparaisons humain-machine sur le plan de l'intelligence formulées par Marvin Minsky, dont le manque de critère objectif (qu'est-ce qui différencie quelque chose d'intelligent de quelque chose qui ne le serait pas ?) en fait une proposition difficilement falsifiable au sens de Karl Popper.

[45] « The study is to proceed on the basis of the conjecture that every aspect of learning or any other feature of intelligence can in principle be so precisely described that a machine can be made to simulate it. » (McCarthy et al., 1955, p. 1, notre traduction)

notamment au travers de la science-fiction cinématographique. Il est frappant de voir comme l'IA y est systématiquement abordée d'un point de vue anthropomorphique : on y voit régulièrement des robots, plus ou moins physiquement ressemblants à des humains – de *Wall-E (*2008) à *Blade Runner (*1982), *Terminator* (1984, 1991) ou aux hôtes de *Westworld* (1973, 2016) en passant par *I, Robot* (2004) – à des degrés divers d'omniscience ou, au minimum, à des systèmes disposant d'une voix de synthèse – *Her* (2013). Quand ils ne sont pas dotés d'une intelligence hors du commun, ils sont mis en scène comme des apprenants – *Short Circuit* (1986) ou *Chappie* (2015). Rares sont les œuvres populaires qui dépeignent ces systèmes comme un ensemble de composants électroniques et informatiques[46] (*hardware* et *software*), ou mettent en valeur le travail de constitution de ces dispositifs. Une revue exhaustive de travaux, fictionnels ou non, portant sur les machines intelligentes, montre que leur traitement culturel (dans l'Occident anglophone) est ordonné selon quatre axes dichotomiques (Cave et Dihal 2019) :

- Le combat contre la mort : immortalité / perte de son humanité,
- Le travail : libération du travail / obsolescence face aux machines,
- Le plaisir : confort / aliénation,
- Le pouvoir : domination sur autrui / retournement des machines contre les humains.

Le thème machinique percute ainsi un certain nombre de considérations anthropologiques centrales de la vie humaine. Plus anciens, des récits mythiques, en pénétrant l'imaginaire collectif, ont composé un terreau fertile pour accueillir ces discussions (le feu de Prométhée, le Golem talmudique). Le terme d'intelligence artificielle porte en lui cette possibilité de briser, par la technique, la frontière entre l'inerte et le vivant. Ces représentations ont alimenté un imaginaire technique transformateur et l'ont rendu plausible, elles ont fixé un horizon d'attente dont les discours relevant du déterminisme justificatoire ont pu se saisir. Les promesses de l'IA ont en cela permis d'alimenter les promesses pour une industrie neuve et désirable. Nous aurons l'occasion d'explorer cette hypothèse dans la section suivante.

[46] Citons comme contre-exemples notables l'ordinateur quantique Rehoboam de la saison 3 de *Westworld* (2020), C3PO de la saga de *La guerre des étoiles (*fabriqué et bricolé au fur et à mesure de la saga*),* ou bien la scène de la désactivation de HAL, dans *2001*, qui voit Dave, l'astronaute survivant, aux prises avec les terminaux du système. Ces dispositifs restent souvent dépeints comme des entités de haute intelligence, voire omniscientes. Néanmoins, il est tout à fait possible d'imaginer des robots non anthropomorphisés. Outre les bras mécaniques industriels, recommandons en ce sens le visionnage cathartique de combats de robot, comme ceux organisés par la National Havoc Robot League (voir leur chaîne YouTube : *https://www.youtube.com/@NHRL*). Optimisées pour détruire et ne pas être détruites, ces machines ne présentent pour la plupart aucun trait commun avec des individus humains.

1.c. Appropriation des promesses de l'IA par le récit de l'*Industrie 4.0*

Pour analyser la perméabilité du récit du renouveau industriel aux promesses de l'IA, nous reviendrons sur la récente genèse du concept *d'Industrie 4.0* et analyserons plus en détail le rôle que joue l'IA dans ses développements. En particulier, nous verrons comment K. Schwab ([2016] 2017) intègre l'IA à sa vision influente d'un renouveau industriel promis.

Industrie 4.0, genèse d'un concept

« L'environnement, les ressources, la santé, l'alimentation, l'énergie, ces grands défis du siècle ne trouveront pas, mesdames et messieurs, de solution à technologie constante, et ils ne trouveront pas non plus de solution durable sans résolution politique. Toute l'histoire de l'Europe s'est bâtie sur l'idée du progrès, la foi dans la capacité des hommes à améliorer leur sort par l'esprit, par la science, par la croissance et par la collaboration des nations. Cette foi ne doit pas faiblir. »[47] Voilà comment François Fillon, alors Premier Ministre de la France, conclut son discours en introduction de la foire de Hanovre en 2011, en Allemagne[48]. La pensée techno-solutionniste, décrite et critiquée par E. Morozov (2013), trouve ici une illustration remarquable : à « technologie constante », c'est-à-dire sans innovation technologique, il ne serait pas possible de résoudre les problèmes essentiels, qu'ils soient sociaux, environnementaux, voire de satisfaction des besoins primaires. Cette posture fait de l'innovation technologique une nécessité pour assurer un avenir prospère à l'humanité.

C'est lors de cette même foire que se déploie pour la première fois le concept d'*Industrie 4.0*[49]. K. Schwab ([2016] 2017:19) explique, *a posteriori*, qu'il sert « à décrire la manière dont ces transformations vont bouleverser toutes les filières de l'économie mondiale ». Le concept serait alors doté d'une valeur heuristique. Il permettrait de donner des clés de compréhension du monde, en particulier aux acteurs économiques, de sorte qu'ils puissent faire face aux incertitudes.

L'histoire telle qu'elle est racontée par S. Pfeiffer (2017) est un peu différente. Intéressons-nous d'abord aux trois individus qui, les premiers, ont présenté le concept, car ceux-ci sont bien identifiés. S'ils sont le plus souvent simplement présentés comme des ingénieurs, leur profil est en fait plus hétérogène et surtout, très éclairant pour comprendre leurs objectifs initiaux.

Le premier, Henning Kagermann, est physicien, et a également été PDG de la société SAP de 2003 à 2009. Cette entreprise, qu'il a rejointe dès 1982, conçoit des logiciels de gestion, ou progiciels de gestion intégrés (le terme ERP est fréquent dans la littérature)[50]. Proche d'Angela Merkel, il est nommé par celle-ci directeur d'un groupe de travail sur les politiques publiques de l'innovation l'année qui précède la fameuse édition de la foire d'Hanovre (A. Crawford 2010). Le second, Wolf-Dieter Lukas, est également

[47] Pour voir le discours en français : *https://www.dailymotion.com/video/xhyia8* (à partir de 14:50).

[48] Le nom germanophone de l'événement est « Hanover Messe », où *die Messe* se traduit aussi bien par « exposition » que par « messe » au sens religieux du terme. L'utilisation répétée du mot « foi » dans le discours de François Fillon en est d'autant plus révélatrice d'un espace où s'édifient et se consolident des régimes de croyances.

[49] La terminologie en *-ie* se justifie par l'origine allemande du terme.

[50] Ces logiciels, qui servent à piloter les flux de production, à organiser le travail, sont typiquement ceux qui accompagnent la transformation de l'industrie depuis quelques décennies.

physicien, et est engagé au Ministère Fédéral de l'Education et de la Recherche à partir de 1998 ; en 2005, il est nommé responsable des technologies de pointe à ce même ministère. Enfin, le troisième, Wolfgang Wahlster, est professeur de sciences computationnelles à l'université et directeur du *German Research Center for Artificial Intelligence* (DFKI). Entre 2006 et 2013, il fait également partie d'une Alliance de Recherche Industrie-Science à l'initiative du gouvernement allemand dans lequel il tient un rôle de promotion de ce projet. Le triptyque privé-public-recherche, constitutif des acteurs de la promesse comme nous l'avons vu avec F. Lussier-Lejeune en introduction du chapitre, est ici apparent.

Dix ans après la foire d'Hanovre, Wolfgang Wahlster donne un entretien à la revue du DFKI dans lequel il revient sur cet épisode marquant de son histoire professionnelle (Wahlster 2021). Il y explique la genèse du concept d'*Industrie 4.0* : « En septembre 2010, le groupe de promoteurs a décidé de définir un nouveau projet basé sur des tendances comme l'Internet des objets (IoT), l'Internet des services, et les systèmes cyber-physiques (CPS). Nous avons positionné le projet dans la sphère des CPS, car à cette époque, en Allemagne, un emploi sur deux dépendait directement ou indirectement de la fabrication de produits. Autour de décembre 2010, lors d'une réunion à l'Académie allemande de Science et d'Ingénierie (acatech) à Berlin avec mes collègues Kagermann et Lukas, nous étions d'avis que le terme "système de production cyber-physique" était un nom trop compliqué pour le projet, alors j'ai suggéré "*Industrie 4.0*", qui serait compris plus intuitivement. L'indicateur "4.0" représente la quatrième révolution industrielle, tout en faisant référence au rôle essentiel joué par les programmes informatiques (à la manière des noms de versions en informatique) [51]. »

Plusieurs commentaires peuvent être formulés sur cette citation importante pour comprendre les origines de l'*Industrie 4.0*. D'abord, conformément à ce qu'énonce Schwab, les technologies de l'*Industrie 4.0* ont bien préexisté au concept, puisque celui-ci s'est formé en réaction à leur déploiement progressif. L'idée de « révolution industrielle » est également présente dès le départ. En revanche, l'interprétation de Schwab omet complètement les ambitions initiales du trio allemand. Elles résidaient alors dans la relance compétitive de l'Allemagne ainsi que dans le souhait du retour de la croissance économique, dans le contexte d'une sortie de la crise de 2008. Les industriels allemands avaient également entr'aperçu les risques d'une hégémonie des géants de la *tech* étasuniens (GAFAM[52] en tête) surtout en ce qui concerne la captation des données des clients (Kohler et Weisz 2018). L'objectif était de diffuser auprès des acteurs économiques du monde entier un discours qui soit compatible avec le modèle allemand.

Quelques minutes avant François Fillon, Wolfgang Wahlster avait eu l'opportunité d'évoquer et de décrire l'*Industrie 4.0* devant des centaines d'industriels du monde entier, alors qu'Angela Merkel l'avait repris en conclusion, donnant ainsi un formidable écho à la proposition. La mise en récit initiale, opérée par le trio

[51] « In September 2010, the Promoters Group decided to define a future project based on scientific trends like the Internet of Things, Internet of Services, and Cyber-Physical Systems (CPS). We positioned the project in the area of cyber-physical production systems, since at that time every second job in Germany depended directly or indirectly on the manufacturing of physical products. By December 2010, at a meeting at the German Academy of Science and Engineering (acatech) in Berlin with my colleagues Kagermann and Lukas, we were of the opinion that the term "cyber-physical production systems" was too unwieldy a name for the future project, so I suggested the intuitively understood "Industrie 4.0." The designator "4.0" represents the 4th Industrial Revolution, while simultaneously indicating the essential role software plays (in the manner of naming versions in the IT branch) » (notre traduction).

[52] L'acronyme désigne les entreprises Google, Amazon, Facebook (désormais Meta), Apple, Microsoft.

« d'ingénieurs » proches de la recherche comme du secteur privé, a ainsi été parfaitement relayée par l'Etat allemand, représenté par sa chancelière.

Des racines plus profondes

Pour S. Pfeiffer pourtant (2017), le récit centré sur l'Allemagne n'est pas suffisant pour expliquer la diffusion mondiale du discours de l'*Industrie 4.0*. L'Allemagne, admet-elle, a été un acteur majeur dans la formation de ce récit, notamment grâce à des entreprises qui se le sont rapidement approprié (parce qu'il servait leurs intérêts) et ont travaillé à fournir les équipements et les machines pour le favoriser (même raison). Mais en amont, les préoccupations de déclin économique concernaient l'ensemble du monde occidental. S. Pfeiffer donne un rôle prépondérant aux cabinets de consultants. Au travers d'un certain nombre d'études alarmantes en sortie de la crise de 2008, ils ont posé le constat d'une économie en baisse de compétitivité, qu'il s'agisse de l'Europe de l'Ouest ou des Etats-Unis, face aux nations dites émergentes comme la Chine.

Ces études se sont accompagnées d'une série de recommandations stratégiques. S. Pfeiffer cite l'exemple d'une stratégie conçue par le cabinet Deloitte dès 2009, et qui porte déjà en elle les germes de la logique *Industrie 4.0*. Ce rapport encourage au déferlement de différentes vagues de changements, la première étant la co-construction d'une « infrastructure numérique », c'est-à-dire un ensemble d'institutions, de pratiques, et protocoles incluant les nouvelles technologies (Hagel III, Brown, et Davison 2009). Cette infrastructure devrait être organisée collectivement, et notamment sur la base de la participation de dirigeants institutionnels. Dans quel but ? Le constat originel du rapport est le suivant : aux Etats-Unis, et d'après un autre rapport de Deloitte, la productivité du travail ainsi que l'intensité compétitive n'ont fait qu'augmenter depuis les années 1960, tandis que le rendement des actifs[53], lui, diminue drastiquement. Autrement dit, la performance des entreprises étasunienne est en berne car le travail est plus productif, mais rapporte moins aux entreprises. La raison, estiment les auteurs, est que les entreprises ne parviennent pas exploiter le plein potentiel des nouvelles technologies numériques, alors que les startups et les clients gagnent en pouvoir sur les marchés. Le développement d'une culture numérique globale est, dans ce contexte, un moyen pour rétablir et renforcer la position de force des acteurs économiques occidentaux sur le marché mondial. Elle passerait par ailleurs par une politique de relocalisation à rebours des opérations de délocalisation opérées dans les précédentes décennies.

En cela, la notion d'*Industrie 4.0* a pleinement joué son rôle de catalyseur d'une vision commune, adossée à des métriques économiques qu'il s'agissait d'améliorer, dans un contexte résolument libéral de « compétition ouverte » (Rugraff 2019). L'*Industrie 4.0*, de ce fait, est moins une révolution technologique qu'une tentative de mobilisation pour éviter un « décrochage technologique » qui, selon E. Rugraff (2019), n'aura pas été suffisante dans l'Union Européenne compte tenu des divergences d'intérêts entre pays membres. Malgré tout, l'*Industrie 4.0* ne peut être résumée à une vision abstraite, bien que ce soit sur cette base qu'elle ait été présentée (Pfeiffer 2017). Sa construction s'est opérée progressivement, et continue de le faire, sur un modèle abductif de face à face avec la réalité (Reverdy 2021:33). A la fois performatives et spéculatives, les anticipations relatives au renouveau de l'industrie se transforment en

[53] En anglais *return on assets*, il est calculé en faisant le rapport du résultat net d'une entreprise sur une année par rapport à la somme de ses actifs nets. Cet indicateur mesure le degré de capacité d'une entreprise à générer du profit à partir de ses capitaux.

intégrant (ou en mettant de côté) des technologies émergentes (ou qui avaient été surestimées). Le discours s'adapte, car il fait face à des décideurs incertains qui ne demandent qu'à suivre un cap. De nouveaux enjeux peuvent alors intégrés au récit orthodoxe, ou passés sous silence. La quatrième révolution industrielle, comme récit, a entraîné de véritables mouvements qui, s'ils ne sont pas nécessairement ceux qui étaient prophétisés à l'origine, ont tout de même contribué à transformer l'industrie et le travail.

Des politiques européennes de la transformation numérique de l'industrie dans les années 2010

Tout au long de la décennie 2010, les pays européens ont adopté des stratégies industrielles de transformation numérique. Une analyse comparative de ces stratégies montre que certaines revendiquent pleinement l'héritage de la notion d'*Industrie 4.0*, là où, pour d'autres états, il s'agit avant tout d'encourager le déploiement de nouvelles technologies de l'information et de la communication (Teixeira et Tavares-Lehmann 2022). Sur les vingt-huit stratégies relevées, seize se concentrent sur la production industrielle, mais les auteures notent que les autres secteurs de l'économie peuvent être impactés eux aussi. En outre, les initiatives sont divisées entre celles qui se fondent sur des partenariats public-privé (c'est le cas de la France et de l'Allemagne) et celles qui sont totalement financées par les acteurs publics. A l'échelle de l'Union Européenne, des programmes sont montés pour faire coexister ces fonds issus de ces programmes nationaux. Les auteures proposent de considérer plusieurs domaines d'action majeurs :

1. Déploiement de technologies de l'information et de la communication pour créer une infrastructure de support de la numérisation de l'économie,
2. Recherche, développement et innovation,
3. Implémentation des technologies émergentes de l'*Industrie 4.0*,
4. Numérisation des petites et moyennes entreprises,
5. Formation et éducation,
6. Régulation et standardisation.

D'après l'étude, la France priorise son action en matière d'implémentation des technologies aussi bien dans les grandes que dans les plus petites entreprises (3 et 4). L'Allemagne est dans une situation similaire et appuie également son effort dans la formation initiale et continue (5). Ces stratégies témoignent de l'importance donnée à la numérisation de l'industrie par les états. Pourtant, comme le note A. Trauth-Goik (2021) qui s'est intéressé aux stratégies étatiques de l'*Industrie 4.0* à l'échelle mondiale, les préoccupations légitimes de K. Schwab concernant les classes moyennes[54], l'environnement, les inégalités et la nature du travail ne sont pas du tout intégrées à ces stratégies nationales[55]. Les enjeux

[54] Même s'il ne la cite pas, K. Schwab a visiblement été marqué par l'étude de D. Autor et D. Dorn (2013) qui montre la croissante polarisation des emplois aux Etats-Unis autour d'une majorité d'emplois à hauts salaires très qualifiés et d'emplois à bas salaires peu qualifiés. La classe moyenne, de son point de vue, est menacée et risque l'appauvrissement. K. Schwab évoque peu les salariés qui seraient déjà les plus précaires.

[55] Cela n'empêche pas que des projets de recherche aient également pu être menés en ce sens. Sur la thématique du travail, par exemple, de nombreuses études ont été financées dans le cadre du projet Beyond 4.0 par le programme Horizon Europe. Ces études, essentiellement qualitatives et dont un grand nombre servent de référence à cette thèse, portent sur l'évolution de la nature, de l'offre, et de la demande en compétences (Behrend et al. 2022; Behrend et Cuypers 2023; Kohlgrüber et al. 2021), sur la participation des salariés à l'innovation (Greenan et Napolitano 2021), sur la notion de révolution technologique (Perez et Leach 2022a, 2022b), sur

économiques sont largement prévalents par rapport aux défis sociétaux de lutte contre la pauvreté et les inégalités. Dans l'adoption du cadrage de l'*Industrie 4.0*, les états n'auront majoritairement retenu que ceux qui concernent les modèles d'affaires et leur applicabilité technique en laissant de côté la dimension sociale de ces transformations.

Etayer, avec l'IA, le discours du renouveau industriel

Quelle est, justement, la place que tient l'IA au sein de cette vision ? Les applications pour l'IA dans l'industrie sont nombreuses : optimisation de processus, maintenance prédictive, contrôle qualité, tâches effectuées à l'aide de robots, formation personnalisée (Peres et al. 2020). La capacité de ces outils à traiter des données, complexes, et rapidement, ouvre un large champ de possibilités pour les industriels en quête d'une augmentation de la productivité et de la qualité de la production, ou d'une rationalisation de leur organisation.

K. Schwab ([2016] 2017) donne à l'IA une place centrale dans son livre, et a abondamment recours aussi bien aux registres eschatologique que technosolutionnistes pour la caractériser. Dès la préface de l'édition française, rédigée par Maurice Lévy, ancien directeur général de Publicis, le ton est donné. Sous sa plume, l'IA désigne avant tout une technologie monolithique, associée à une « disruption » (p. 7), qui pourrait « menace[r] [la société] » (p. 8) étant donné la possibilité d'une perte de maîtrise. Ces assertions sont typiques du discours de la singularité technologique que nous évoquions dans la section précédente. Décrits de telle façon, les dispositifs d'IA ne sont plus envisagés comme des systèmes sociotechniques parmi d'autres avec leurs contraintes matérielles particulières, mais plutôt comme un phénomène qui pourrait échapper à notre vigilance. La sociologue L. Suchman (2021) (citée par (Raley et Rhee 2023)) a bien remarqué en effet, comment l'IA est présentée comme une technologie unique et sans précédent, dont la mesure doit impérativement être prise.

L'idée d'entités intelligentes façonne l'impression que la technique, personnifiée, pourrait s'émanciper d'un contrôle humain qu'il serait nécessaire d'assurer. K. Schwab souscrit à cette perspective lorsqu'il s'inquiète de la perte de contrôle de l'IA, citant notamment Max Tegmark, co-fondateur du *Future of Life Institute* et figure emblématique du discours catastrophiste sur l'IA. D'un autre côté, le recours à l'IA est avant tout vu comme une opportunité, et en particulier une possibilité de « renforcer la capacité de production » (p. 18). K. Schwab dépeint des systèmes capables de « s'autoprogrammer », occultant au passage les processus de conception et de déploiement de ces systèmes. Dans le prolongement de la tendance du *smart* (le *smart grid*, la *smart city*), des robots, ordinateurs, assistants sont désormais qualifiés « [d']intelligents » (p. 23). K. Schwab se risque à plusieurs prédictions : bientôt nous parlerons aux ordinateurs[56], bientôt des robots « anticiperont nos besoins, sans même qu'on leur demande » (p. 23). L'anthropomorphisation ambiguë qui a suivi les développements des technologies d'IA sert complètement le propos. Elle les valorise, les rend impressionnants, convainc *a priori* de leur efficacité. Sur ce plan, un encadré intitulé « Aux limites de l'éthique » dresse un certain nombre de dilemmes à

l'évolution du marché de l'emploi (Curci, Greenan, et Napolitano 2023) ou encore sur la plateformisation du travail (Greenan et al. 2023).

[56] Rendons hommage à cette prédiction qui, même si elle est suffisamment imprécise pour trouver des pistes de validation, prend une tournure particulière alors que des cas de dépendance émotionnelle à des agents conversationnels sont désormais recensés (Duane 2025).

propos des algorithmes de recommandation ou prédictifs : « Que faire ? Devons-nous suivre le conseil d'un algorithme ou faire confiance aux suggestions de notre famille, nos amis ou nos collègues ? Aurons-nous recours à un robot médical équipé d'un système d'IA qui établira un diagnostic quasiment infaillible, ou resterons-nous fidèles au médecin humain qui nous a soigné pendant des années et à ses manières rassurantes ? » (p. 122). La machine est mise sur le même plan que l'entourage, que le professionnel, que l'expert, elle est envisagée comme une substitution pure et simple de la structure sociotechnique existante. En outre, l'hypothèse qui permet d'envisager que des algorithmes puissent être utilisés pour réaliser de telles opérations n'est jamais questionnée.

Le piédestal conçu par K. Schwab lui permet ensuite, devant le vertige posé par ces problématiques, d'envisager que nous soyons « amen[és] en territoire inconnu, à l'aube d'une transformation totalement inédite de l'espèce humaine » (p. 123). Le pouvoir transformateur de la technique n'est plus ici seulement appliqué à l'environnement de l'humain, mais à l'humain lui-même, sur le point de subir une rupture anthropologique.

Le récit que fait K. Schwab résonne étonnamment avec le propos de J. Baudrillard, qui au sujet des premiers pas sur la Lune écrit : « Car l'exaltation des foules n'allait pas à l'événement du débarquement sur la Lune ou du cheminement d'un homme dans l'espace […], non, la sidération va à la perfection de la programmation et de la manipulation technique. » (1981:59). J. Baudrillard explique ici que la conquête spatiale a pu servir à démontrer l'hégémonie de l'humain sur l'univers, domestiqué, dans lequel il était désormais possible de se mouvoir librement. Chez K. Schwab, la sidération n'est pas devant le contrôle total de l'environnement grâce à la technique. La qualité des systèmes d'IA, qu'il loue, n'est pas rattachée aux prouesses techniques de leurs concepteurs. Il met au contraire en valeur le manque de maîtrise, la possibilité d'une technologie qui échappe à ses créateurs et vienne les reconfigurer, comme le feu prométhéen.

La quatrième révolution industrielle serait l'occasion de tels changements en profondeur, en partie grâce ou à cause de l'IA. La mobilisation du discours eschatologique sur l'IA, qui appelle à la prudence mais génère aussi une excitation inquiète, ne justifie pas la désirabilité du futur promis. Elle ne fait qu'en attiser l'inéluctabilité[57].

[57] Comme le souligne K. Schiølin (2020), la rhétorique de l'inévitable ne se confond pas avec le déterminisme technologique. Une posture déterministe peut envisager une causalité de l'objet technique sur son environnement sans présupposer que cet événement advienne. Cela dit, les deux vont souvent de pair, au sens où le motif de l'inéluctabilité et le déterminisme justificatoire se nourrissent l'un l'autre.

1.d. Une révolution inéluctable qui demande des réponses urgentes ? Un rapport au temps singularisé

La relation au temps est l'un des dénominateurs communs des discours qui portent sur les nouvelles technologies. Lorsqu'un enjeu émerge autour de leur adoption, la promesse porte ainsi sur la radicalité de la nouveauté (Joly 2015). Celle-ci est exprimée vis-à-vis d'un existant, qu'il s'agit de dépasser, de ringardiser, pour mieux souligner l'intérêt des « nouvelles nouvelles technologies » (Howcroft et Taylor 2014). Dans cette sous-section, nous souhaitons caractériser les promesses liées à la quatrième révolution industrielle et à l'IA en situant leur relation commune au temps. Pour cela, nous souhaitons mettre en avant trois motifs discursifs : l'inéluctabilité, la *grande époque*, et la révolution, sur lequel nous commencerons par nous attarder.

Du progrès à l'innovation : changement de temporalité

Pour motiver les changements technologiques, la société industrielle s'est composée autour du médaillon du progrès, sur lequel l'histoire de France se serait bâtie, si l'on prend au mot François Fillon. Le progrès dessine un horizon positiviste vers lequel l'ensemble de la société doit se tourner, et s'activer, pour espérer un monde et des conditions de vie meilleures. Il est rendu crédible par une « naturalisation du progrès technologique » (Joly 2015), processus par lequel le progrès est rendu naturel, comme allant de soi, par exemple en érigeant en tant que lois des règles qui viendraient quantifier son évolution. P.-B. Joly évoque à ce titre la loi de Moore, éminemment structurante pour l'industrie du semiconducteur, et qui voudrait que la taille des micro-processeurs soit doublée tous les dix-huit mois.

Cette idée d'une linéarité et d'une continuité de l'amélioration de la société par la technique a été largement débattue. Dans son livre qui dresse une histoire de la critique des technologies, F. Jarrige (2014) montre que le progrès n'est pas universellement reconnu comme une valeur cardinale, et que ce n'est qu'au cours du XIXème siècle qu'il a commencé à être conçu comme tel[58]. L'attachement au progrès ne serait pas tant une évidence anthropologique qu'un leitmotiv intéressé. Plus récemment, le terme d'innovation a d'ailleurs progressivement remplacé celui de progrès pour qualifier ces nouveautés technologiques structurantes[59]. Le mot « innovation » est d'ailleurs omniprésent dans les stratégies nationales de transformation numérique, qui se le sont largement réapproprié (Trauth-Goik 2021). Dans son travail philosophique sur cette notion, T. Ménissier (2021) montre comment l'innovation, entendue dans son acception économique, est résolument orientée selon un cadrage capitaliste. Il ajoute qu'elle « privilégie la rupture par rapport à la continuité et […], dans une certaine mesure, valorise l'imprévisibilité vis-à-vis de la planification » (p. 129). En comparaison du progrès, comme le note F. Aggeri (2023), la notion d'innovation se trouve être dépolitisée, et ses logiques plus difficiles à contester.

Pour autant, si l'on se place du point de vue d'un industriel lambda, la promesse d'une rupture n'est pas nécessairement accueillie d'un bon œil. Elle implique des transformations, des changements, qui sont

[58] F. Jarrige explique que le régime d'historicité (c'est-à-dire le rapport au temps construit, souvent implicite, d'une société donnée) occidental s'est centré autour du progrès, en tant que progrès technique, durant le XIXème siècle. Selon lui, la fameuse assertion « On n'arrête pas le progrès » est avant tout un slogan qui motive le déploiement de l'automobile à la fin de ce siècle, qui est en ces temps une technologie controversée car jugée dangereuse.

[59] Mais pas seulement, on parle également « d'innovation managériale », par exemple.

difficiles à intégrer au sein d'organisations dont la complexité, la verticalité et la hiérarchisation renforcent l'inertie. En cela, la prophétie de K. Schwab d'une révolution industrielle autonome, qui arriverait sans qu'elle ne puisse être opposable, est l'une des manières de forcer le passage à l'action. Pour la contextualiser, il a intégré cette révolution industrielle dans un schéma quaternaire.

Construire une taxonomie *ad hoc* pour introduire la quatrième révolution industrielle

Le récit de le quatrième révolution industrielle se structure autour d'un découpage de la chronologie en périodes entrecoupées par des années charnières, lors desquelles se produisent des événements importants impliquant l'invention ou la diffusion de nouvelles technologies. Il dénombre, de ce point de vue, quatre révolutions industrielles, voir un exemple avec la Figure 7. La première est liée à l'avènement de la machine à vapeur, elle est nommée régulièrement « Révolution industrielle » tout court. Pour K. Schwab, elle augure une période à cheval entre les moitiés des XVIIIème et du XIXème siècles, et se caractérise par l'avènement d'un travail mécanisé, où la force de l'humain serait substituée par la force mécanique. Une seconde révolution intervient au moment de la démocratisation de l'électricité, elle est datée par K. Schwab en 1840 : elle est l'occasion de massifier la production industrielle. Une troisième, au tournant des années 1970, est liée à l'introduction massive des ordinateurs et des algorithmes grâce à la miniaturisation des semiconducteurs. Vient ensuite la quatrième révolution industrielle, située autour de 2010, celle des systèmes cyber-physiques, capables de communiquer entre eux, et de systèmes d'IA, capables d'augmenter l'humain. Les tâches pourraient être largement automatisées, déléguées aux machines, en ne conservant qu'une supervision humaine. Pour D. Kohler et J.-D. Weisz (2018:53), l'*Industrie 4.0* « acte la transition du paradigme fordiste vers celui de l'économie numérique. »

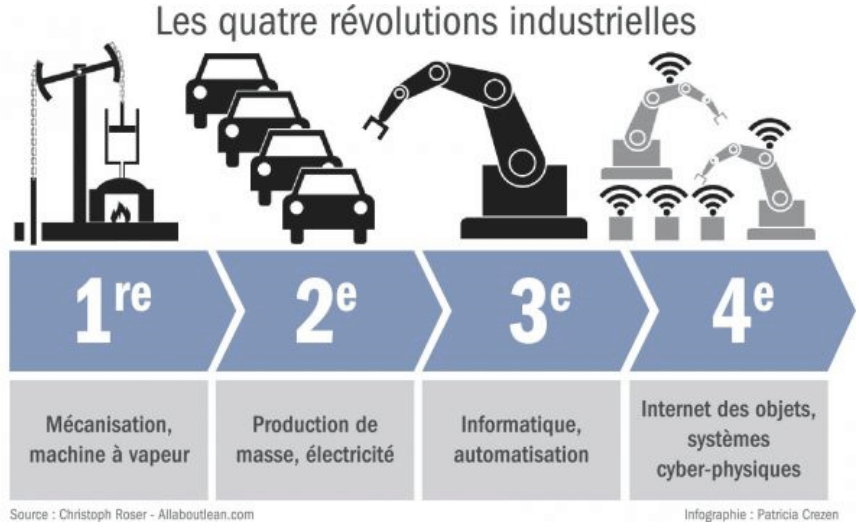


Figure 7 : Exemple de concrétisation schématique du récit des quatre révolutions industrielles.

Numéroter les révolutions

Ce narratif en est un parmi d'autres. La construction d'une historicité de la révolution industrielle permet de la placer dans une chronologie qui alimente et justifie l'argumentaire transformateur. Si ce discours a réussi à s'imposer sur le plan médiatique, il reste contesté. Sur le terrain même des propositions faites par K. Schwab, la rupture n'est pas si nette que cela entre la période qui précède et celle qui suit la quatrième révolution industrielle. Certains auteurs notent que les changements supposément opérés

suite à la révolution en cours ne font que prolonger des transformations déjà existantes, et qu'il serait plus adéquat – ou ironique – de la qualifier de révolution 3.1 (Rüttimann et Stöckli 2016). En effet, les dispositifs caractéristiques de l'*Industrie 4.0* reposent sur des technologies de l'information et de la communication (capteurs, algorithmes, systèmes communicants) qui sont similaires du point de vue technique à ceux qui existaient déjà. La différence ne porte pas tant sur la nature, mais plutôt sur le degré de perfectionnement de ces dispositifs (en particulier, des composants micro-électroniques plus petits, à performances similaires voire meilleures). Cette querelle de chiffres est encore amplifiée par un discours émergent, celui de *l'Industry 5.0*, qui viendrait mettre « l'humain au centre » (Maddikunta et al. 2022), mais dont, là encore, la différenciation avec la vague précédente n'est pas très nette. On assiste ainsi, en un sens, à une industrialisation de l'idée-même de nouvelle révolution industrielle, manufacturée, repackagée, à intervalles plus ou moins réguliers. Au fond, cette surenchère sur la forme semble être une manière de masquer une faiblesse dans la réalité et la radicalité de la nouveauté.

Un autre argument (que l'on peut également confronter à l'idée même de révolution industrielle) questionne les conditions et la localisation de la quatrième révolution industrielle. Il vient affirmer que ce discours ne pourrait être que situé, ciblé. En l'occurrence il vise plutôt les puissances occidentales dont la compétitivité relative face à des pays comme la Chine est mise en jeu. En outre, certains pays n'ont pas les moyens de s'équiper des coûteux équipements nécessaires à cette transition industrielle, en plus de faire face à des difficultés d'accès à l'électricité et à Internet ou au manque de travailleurs qualifiés (Asghar et al. 2020). Dans ce contexte, A. Trauth-Goik (2021) suggère qu'il serait vain d'espérer des effets positifs globaux de processus de déploiement technologique massif : « L'hypothèse que la vision néolibérale du monde, adoptée actuellement, conduira à une techno-utopie, dément la réalité au sens où l'inégalité, la dégradation de l'environnement et l'injustice restent endémiques du système dans lequel ces technologies sont élaborées[60]. » (2021:62). Les études concernant l'impact de la numérisation sur la demande en énergie, la consommation de ressources et la création ou le renforcement d'inégalités, ont permis de documenter ces dérives (ADEME 2022; Creutzig et al. 2022).

Cartographier les révolutions

Parler de révolution pour justifier un projet de développement technologique n'est pas révolutionnaire. C'est même un geste qui s'est banalisé. Dans son enquête sur l'*Industrie 4.0* au travers d'un corpus de documents technocratiques français des années 2010, M. Saraceno (2024) a repéré des proximités rhétoriques avec les discours prospectivistes des années 1980. La construction d'une vision autour de la définition d'une révolution industrielle nouvelle, c'est déjà ce que J. Rifkin (2012) a pu faire quelques années auparavant avec son ouvrage décrivant la Troisième Révolution Industrielle. J. Rifkin la fait commencer au même moment que celle de K. Schwab, mais se concentre sur la synergie entre énergies renouvelables et technologies de l'information et de la communication. Là encore, l'exposition prophétique d'une révolution en cours est une suggestion en forme de feuille de route, destinée aux acteurs économiques, publics et privés.

[60] « The assumption that the currently adopted neoliberal worldview will lead to a techno-utopia belies the reality that inequality, environmental degradation and injustice remain rampant within the current system in which such technologies are constructed » (notre traduction).

La chercheuse C. Perez a consacré de nombreux travaux sur la question des révolutions technologiques. Dans une étude menée avec T. Leach (2022a), elles dégagent pas moins de sept approches théoriques pour les envisager[61]. Leur propre approche est qualifiée de néo-schumpéterienne, elle insiste sur le rôle de l'Etat et de la société toute entière (et non plus seulement le marché comme avec Schumpeter) dans le guidage du comportement des acteurs économiques. Par contraste, bien que les gouvernements se soient saisis du discours de l'Industrie 4.0 pour élaborer leurs politiques publiques, ils doivent eux aussi, selon K. Schwab (2017) – que les chercheuses associent à une approche « Business et ingénierie » – s'adapter aux transformations en cours, au risque d'être remis en cause. Les différentes perspectives mises en lumière par ces auteures sont issues de disciplines différentes : économie, histoire, sociologie. Elles affichent des modes de périodisation et des décomptes du nombre de révolutions qui diffèrent également. De plus, toutes ne confondent pas révolution industrielle et révolution technologique, puisque les technologies ne fixent pas toujours le point crucial de périodicité : il peut s'agir d'un changement dans le mode de production ou d'organisation, ou bien de périodes distinctement considérées comme des moments d'élaboration ou de diffusion de nouvelles normes. Devant tous ces désaccords, nous pouvons nous interroger : que justifie le fait de parler d'une révolution industrielle ? Le terme de révolution charrie avec lui une longue tradition historique de ruptures paradigmatiques. Dans le champ politique, bien sûr, mais aussi en philosophie des sciences, où la vision positiviste d'A. Comte (1989) a cédé face au concept de révolution scientifique, d'abord incarné par la fin de l'hégémonie géocentrique. A. Koyré, puis T. Kuhn (1962), ont contribué à objectiver puis pluraliser le substantif.

Les analyses de C. Perez et T. Leach sont ancrées dans l'idée d'une périodisation du temps dont elles font l'hypothèse. Pourtant, comme le suggère d'entrée de jeu l'historien P. Verley dans le livre *La Révolution industrielle* qui prend le terme comme un objet d'étude à part entière, « la notion de révolution industrielle n'est plus une évidence pour les historiens » (1997:9). Il revient notamment sur les critiques portées vers les approches quantitatives de la révolution industrielle qui entrevoient ces mutations uniquement sous l'angle de la croissance économique. L'ambition n'est pas de nier la réalité de changements sociétaux profonds, mais de les analyser à la lumière de prismes plus continuistes, moins sensationnalistes, plus contextuels.

Inéluctabilité et grande époque

En sus de la positionner sur une frise chronologie *ad hoc*, le discours de la quatrième révolution industrielle élabore également un rapport au temps particulier. Dans son analyse des productions textuelles du Forum économique mondial, K. Schiølin (2020) repère deux autres motifs discursifs majeurs.

Le premier motif est celui de l'inéluctabilité : *la révolution industrielle est en marche, et nous ne pouvons pas l'arrêter*. Il s'agit de se montrer fataliste et de dénoncer l'incapacité de l'humain à enrayer un phénomène qui le dépasse. C'est un motif puissant, prodigué sous un voile de déterminisme justificatoire.

[61] Différents découpages temporels sont envisagés selon les approches, sachant que ces courants ne sont pas parfaitement hétérogènes (il s'agit d'une analyse *post hoc*). Parmi eux, on compte d'abord la perspective schumpetérienne (du nom de l'économiste austro-étasunien J. Schumpeter, qui a vécu au début du XXème siècle), laquelle considère l'innovation et l'investissement comme le moteur de la croissance économique, suivant des phases cycliques d'essor et de déclin. D'autres perspectives sont présentées : sociohistorique ; orientée vers l'innovation (les auteures font référence au travail de G. Mensch (1979)) ; sociotechnique (incarnée par les STS). Pour une caractérisation exhaustive, lire (Perez et Leach 2022a).

Chez K. Schwab, ce motif se manifeste très explicitement, par exemple : « Des innovations technologiques majeures sont sur le point de provoquer d'immenses bouleversements dans le monde entier. C'est inévitable. » ([2016] 2017:21). Comme le suggère T. Reverdy, cette rhétorique en vient à adopter le « registre de la menace » (2021:34), en érigeant la transformation numérique en une nécessité sans vraiment en aborder la désirabilité. Citant un billet de L. Winner (1998), K. Schiølin rappelle le rôle rassurant du destin et d'un futur déjà écrit. Et comme c'est le Forum économique mondial qui délivre d'abord le discours, note K. Schiølin, il se positionne en acteur majeur pour « formuler, avec autorité, les valeurs et l'éthique du futur[62] » (2020:552). Mais il n'est pas nécessaire d'envisager des crises de grande échelle pour faire émerger des scénarios alternatifs. Comme nous l'avons vu, l'inéluctabilité construite par le discours de la révolution industrielle est en fait le reflet de contingences qu'il était nécessaire d'ériger en obligations pour satisfaire des enjeux économiques. C'est probablement la raison pour laquelle la rhétorique de l'inéluctabilité est reprise par les acteurs publics pour motiver des stratégies en relation avec des innovations technologiques, comme avec les nanotechnologies et l'IA (Bareis et Katzenbach 2022; Colleret et Khelfaoui 2021).

Un second motif est celui de la *grande époque*[63] *: nous vivons une époque comme nulle autre pareille*. Il est question de considérer l'instant présent comme étant une période de choix décisifs, où tout se joue. La grande époque est ainsi le moment où les acteurs sont poussés à agir, car leurs actions sont déterminantes et auront des conséquences importantes sur le futur. Ce motif se marie très bien avec celui de la disruption, puisque le second justifie le premier : puisque la situation implique de grands changements, il est logique de devoir passer à l'action en conséquence. Dans la description de la quatrième révolution industrielle, la rapidité des changements annoncés par K. Schwab encourage en outre à considérer cette *grande époque* comme étant une *grande époque courte* qui demande des réponses institutionnelles rapides. K. Schiølin (2020) pointe du doigt le recours abondant aux superlatifs chez K. Schwab mais aussi dans l'ensemble des publications du Forum économique mondial. Les toutes premières lignes de l'introduction de *La Quatrième Révolution Industrielle* sont caractéristiques de ce motif[64]. Pourtant le caractère urgent de la situation présentée n'est pas spécialement convaincant. Comme le note J. Johns (2019), dans un contexte géopolitique troublé, de crise environnementale et de montée des nationalismes (et c'est d'autant plus le cas sur ces trois plans depuis la rédaction de son article), le besoin de concentrer l'attention de la communauté internationale sur le déploiement technologique ne se ressent pas clairement.

[62] « By rendering 4IR seemingly inevitable, WEF secures itself an edifying position from which it can authoritatively formulate the values and ethics of the future » (notre traduction).

[63] C'est ainsi que nous proposons de traduire le terme anglais d'*epochalism* utilisé par K. Schiølin, qu'il emprunte à C. Geertz (1973).

[64] « De tous les défis multiples et fascinants auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui, le plus important est de comprendre et orienter la nouvelle révolution technologique, qui n'implique rien de moins qu'une transformation de l'humanité. Nous sommes à l'aube d'une révolution qui bouleverse déjà notre manière de vivre, de travailler et de faire société. Ce phénomène inédit par son envergure et sa complexité constitue ce que je considère comme la Quatrième Révolution Industrielle. » (Schwab [2016] 2017:11)

Un *pattern* dans les motifs : convergence entre singularitarisme et *Industrie 4.0*

Ces trois motifs discursifs (la révolution, l'inéluctabilité, la grande époque) ne sont pas étrangers au discours produit sur l'IA. On les retrouve en effet dans le récit de la singularité technologique.

Popularisé (notamment) par R. Kurzweil avec son livre *The Singularity is Near* (2005), le singularitarisme prophétise l'avènement d'un événement futur et certain : la singularité technologique. La singularité correspond à un moment précis, charnière, où l'IA générale (on lit AGI chez les anglophones) serait finalement inventée et où l'IA pourrait aller jusqu'à prendre conscience d'elle-même. Dès lors, devenue « autopoïétique » (Cassiani-Laurin 2018), elle serait capable de se fixer ses propres objectifs, de déterminer les moyens d'y contribuer et d'avoir des effets sur le monde indépendamment de toute volonté humaine. Comme une telle entité agirait au rythme d'une quantité de calculs impossible à appréhender par l'esprit humain, le monde serait lui aussi modifié par l'action de l'IA à un rythme effréné, impensable. C'est précisément cet instant, où la temporalité du réel commencerait à échapper à l'humain, que se produirait la singularité technologique. Ce discours a ses écueils. J.-G. Ganascia en fournit une critique étoffée dans son livre *Le mythe de la Singularité* (2019) qui revient en détails sur les problèmes posés par ce récit, comparable, selon lui, à celui d'une croyance religieuse. En dépit des dérives radicalement utilitaristes, voire totalitaires, intrinsèques à ce discours (Cassiani-Laurin 2018), celui-ci ne déplaît pas à de grandes entreprises du numérique, comme Google[65]. R. Kurzweil y a été embauché pour travailler sur ces questions et diffuser sa pensée[66].

Du point de vue de l'analyse des discours, on retrouve dans ce récit un certain nombre de similarités avec celui de la quatrième révolution industrielle : disruption, inéluctabilité, grande époque. Le caractère disruptif, d'abord, est marqué, puisque la singularité technologique représente un moment de rupture technique mais aussi cognitif[67] (en comparaison avec une révolution industrielle qui serait une rupture plutôt technico-économique). Le nom même de « singularité » affiche une rupture si on l'entend dans son acception mathématique. La singularité technologique est également vue comme inéluctable par les singularitaristes, R. Kurzweil prédit qu'elle arrivera en 2045 et considère qu'elle est une étape inévitable du processus d'évolution biologique : c'est une suite logique, implacable, de la continuation de l'amélioration humaine, laquelle pourra se passer, à terme, de son enveloppe charnelle (2005)[68]. Quant au sentiment de vivre dans la grande époque où tout se joue, et au sein de laquelle il serait nécessaire d'agir, la lettre ouverte du *Future of Life Institute* (2023) en est une illustration parfaite. Ses auteurs insistent sur le besoin de s'arrêter, de faire une pause maintenant, avant qu'il ne soit trop tard. On pourra

[65] Et ce, au grand dam des détracteurs du singularitarisme, qui voient dans la légitimation des risques formulés en termes de « sûreté » (*AI safety*) un contre-feu cherchant à distraire des problèmes occasionnés par ces technologies (Gebru et Torres 2024).

[66] Depuis 2012, R. Kurzweil est employé chez Google, qui avait déjà financé son Université de la Singularité (Letzing 2012). Cette université est en fait une entreprise qui dispense des formations payantes. Par exemple, elle propose une formation « Futur de l'IA » de trois jours dont une rediffusion est accessible pour la modique somme de 1 095 dollars (*https://www.su.org/*).

[67] A noter que, du point de vue d'une bonne partie des chercheurs en IA, les avancées dans le domaine sont plutôt envisagées de façon relativement continue (Bellon et Velkovska 2023).

[68] Cette inévitabilité reste un point de débat, et, parmi une partie des tenants du discours techno-catastrophiste, beaucoup souhaitent au contraire mettre en œuvre des moyens pour l'empêcher d'advenir ; cela passe, notamment, par des mécanismes techniques de garde-fou la réalisation d'artéfacts technologiques encore plus puissants pour les contrôler.

également citer l'initiative d'Eliezer Yudkowsky, un autre idéologue de la Singularité, qui a participé à fonder, avec R. Kurzweil le *Singularity Institute for Artificial Intelligence* (aujourd'hui *Machine Intelligence Research Institute*) dans l'objectif de concevoir au plus vite une « IA amicale » (Waters 2014). Le récent collectif *Pause AI*, largement inspiré de ces discours, cherche également à limiter les avancées technologiques dans le domaine en demandant un arrêt net de la recherche dans le domaine de l'IA générative.

Quand les gouvernements se saisissent des promesses

Les états eux-mêmes ont intégré ces récits dans leurs stratégies économiques. Dans un article publié en 2022, J. Bareis et C. Katzenbach (2022) montrent comment les gouvernements sont affectés par la diffusion de récits, qu'ils soient collectivement partagés ou issus d'entreprises du numérique, et participent en retour à cadrer la perception et les attentes autour de l'IA. Les auteurs s'intéressent pour cela aux documents stratégiques produits par l'Allemagne, la Chine, les Etats-Unis, et la France[69], entre 2017 et 2021. Trois motifs narratifs se retrouvent chez l'ensemble de ces pays : (1) le caractère inéluctable du déploiement de l'IA, (2) la nécessité de l'IA pour le bien de tous et pour maintenir une compétitivité internationale et (3) une incertitude marquée par des espoirs et des craintes, érigées comme des défis à relever. On retrouve là le triptyque de nous avons mis en avant avec K. Schiølin, respectivement : inéluctabilité, grande époque, disruptivité. Ces récits justifient la mise en action des gouvernements afin de ne pas manquer le train de l'innovation, qui représente des enjeux socio-économiques perçus comme majeurs. Pour cristalliser ce mouvement économique d'ampleur, les personnels politiques peuvent également employer une « rhétorique du retard » (Lussier-Lejeune 2025:189), au travers d'un parallèle récurrent avec l'épouvantail chinois (Liu et Luo 2025).

Cette vision se traduit aussi dans la politique industrielle française où, dès 2015, le programme « Nouvelle France Industrielle » est lancé par le Ministère de l'Economie, du Travail et de l'Industrie (mené par Emmanuel Macron, alors ministre). Ce projet met en avant un certain nombre de technologies-clés pour accompagner la relance industrielle et la relocalisation de l'industrie française, dans un contexte où le taux de chômage est élevé. Parmi elles, figure l'IA, mais également des cobots, des réseaux électriques intelligents, des outils de valorisation de données massives ou d'exploitation numérique des données de santé, autant de technologies qui intègrent des algorithmes avec une ambition d'automatiser le traitement de données, voire la prise de décision (Gouvernement français 2016:104-5). Face aux « bouleversements en profondeur [des industries] », la révolution annoncée « est aussi une chance pour combler le retard d'investissement productif pris par la France pendant la dernière décennie et mettre notre industrie au meilleur niveau mondial » (Gouvernement français 2016:13).

Le rapprochement entre les discours de la quatrième révolution industrielle, porté aussi bien par K. Schwab que le gouvernement français, et celui de la Singularité n'est pas qu'une heureuse coïncidence qui permet de faire converger ces thèmes de façon *ad hoc*. Comme nous l'avons montré au travers du recours référentiel à des figures comme Max Tegmark, qui navigue dans des mouvances proches de celle du singularitarisme (Gebru et Torres 2024), K. Schwab et plus largement le discours de la quatrième

[69] Pour ce qui est de la France, il s'agit du rapport commandé au mathématicien et ex-député Cédric Villani sur l'IA (Villani et al. 2018), du discours d'Emmanuel Macron au collège de France, en mars 2018 et du site *https://www.aiforhumanity.fr/* (qui n'est plus fonctionnel au moment de la rédaction de ces lignes).

révolution industrielle adoptent largement une posture déterministe. Le cadrage de la quatrième révolution industrielle conduit d'ailleurs certains critiques à considérer l'*Industrie 4.0* non plus seulement comme un projet technologique global, mais comme un motif idéologique (Fuchs 2018; Moll 2022). S'agit-il seulement d'une stratégie discursive bénigne, ou bien peut-on considérer que ces procédés narratifs invoquant une inéluctabilité, une nécessité, une urgence, relèvent d'une forme de contrainte ? L'engagement de moyens publics considérables dans l'accompagnement de telles évolutions n'est pas, ou faiblement, remis en question dans le débat public. Au fond, la transformation numérique devrait-elle véritablement être l'enjeu du siècle ?

Conclusion (I.1)

Dans cette section, nous avons cherché, au travers du prisme de la promesse, à montrer comment le champ de l'IA s'était constitué autour d'effet d'annonces, indifféremment positives ou négatives. Les difficultés de définition du terme d'IA, mais aussi à savoir ce que désigne exactement l'expression, ont fortement accentué la confusion entre discipline scientifique, système sociotechnique, objet de fantasmes et innovation techno-économique à réguler (Benbouzid et al. 2022).

Le discours de la nouvelle révolution industrielle, diffusé depuis une dizaine d'années, est avant tout un appel à une collaboration entre industriels, chercheurs et décideurs publics pour un regain de dynamisme économique. Plutôt qu'un moyen de décrire la réalité, il s'agit d'un outil performatif qui cherche à faire advenir la réalité qu'il décrit. Les tenants de ce discours ont puisé dans le répertoire de promesses de l'IA, qu'elles s'apparentent au solutionnisme technologique ou à une forme de catastrophisme, pour assoir sa légitimité, et sa crucialité. Le récit décrit une réalité plausible, mais considérée comme inéluctable, qui demande des réponses urgentes, des actions décisives nouées autour de partenariats économiques.

Tout l'objectif de la seconde moitié du chapitre sera d'aller investiguer un peu plus en profondeur les promesses de l'IA non plus dans leur forme et leurs modalités de diffusion, mais dans leur contenu. Qu'est-ce qui est en réalité promis lorsque l'IA est promue ?

2. Contenu des promesses et attentes véhiculées par l'IA dans l'industrie

Après avoir caractérisé, dans leur généalogie et leur forme, les promesses de l'IA et du renouveau industriel, nous souhaitons désormais en analyser le contenu. Dans cette partie, nous chercherons ainsi à expliciter les attentes liées à l'IA pour la quatrième révolution industrielle en montrant la manière dont elles se rejoignent et s'alimentent. A nouveau, il sera essentiellement question d'analyser les discours formulés à leur sujet, sans entrer dans le détail de leur énonciation, tout en prenant soin de les nuancer.

Trois types de promesses seront synthétisées. Les premières concerneront la dimension technique de l'IA et mettront en lumière la tension entre anthropomorphisation et déshumanisation de ces systèmes techniques (2.a). Nous aborderons les secondes, en lien la dimension économique d'une industrie équipée par l'IA, qui serait l'un des facteurs des modèles économiques qui les sous-tendent (2.b). Une troisième sous-section évoquera les interprétations ambivalentes des capacités de l'IA dans la capacité de ces systèmes à modifier l'organisation du travail (2.c).

Pour ce faire, nous mobiliserons en particulier des études empiriques portant sur l'analyse des discours (Maingueneau 2012), qui se sont donné pour objectif de s'intéresser à la manière dont l'IA est promue. Le propos se concentrera sur les promesses de l'IA, et relaiera ainsi l'essentiel des aspects positifs qui sont attribués aux systèmes qui relèvent de ces méthodes. Nous présenterons, pour les contextualiser, les critiques de ces promesses.

2.a. Mettre en scène la comparaison humain-machine au travers de systèmes « efficaces » et « objectifs »

La promotion de l'IA véhicule l'image de systèmes techniques efficaces, fonctionnels. Ce postulat est souvent pris comme un fait établi dans la littérature qui analyse les enjeux sociétaux liés à l'IA, qui cherche systématiquement à le nuancer. Plutôt que de considérer comme acquis que les systèmes d'IA sont représentés comme étant efficaces, nous souhaitons nous attarder sur cette idée un instant. Plus précisément, nous allons caractériser la promesse d'efficacité en pointant les ressorts à partir desquels elle est diffusée. Nous montrerons pour cela comment elle repose sur une tension entre le caractère humain et le caractère non-humain de ces systèmes, entre anthropomorphisation et déshumanisation.

Des systèmes comme des humains

Dans le domaine de la recherche scientifique, au tournant des années 2000, des stratégies rhétoriques consistent à présenter des machines comme des humains (*humanlike*) (Zdenek 2003). Plus récemment, des chercheurs ont noté qu'il existait une tendance récente à la personnification des systèmes d'IA dans les médias concernant les applications médicales (Bunz et Braghieri 2022). Il ne s'agit pas seulement de donner une agentivité aux systèmes techniques, mais de les présenter comme des humains. Certes, de nombreuses entités et créatures issues de la culture collective (mythologie, littérature) ont pu être façonnées « à l'image de l'homme » (Breton 1995) par l'humain lui-même. Pour autant, le récit de l'anthropomorphisation de l'IA va plus loin que la seule poursuite d'une posture réflexive (l'idée d'un miroir tendu à l'humain pour le faire penser sa propre condition). Au contraire, il enclenche la possibilité d'un discours déterministe projetant l'idée que les systèmes d'IA puissent agir par eux-mêmes, indépendamment de la volonté humaine[70].

Cette assimilation générale à l'humanité est cependant nécessaire à nuancer, au sens où la similarité avec l'humain recoupe seulement certaines catégories d'humains. Des études s'interrogent notamment sur la « blanchité » des robots intelligents, souvent représentés avec des caractéristiques physiques représentatives des personnes blanches, à l'instar, relèvent leurs auteurs, de concepteurs originels en majorité californiens (Cave et Dihal 2020; Prévost 2023). En outre, la perspective d'une agentivité machinique se retrouve jusque dans la vision de l'*Industrie 4.0*. Si l'on s'en réfère au discours de W. Wahlster à la foire de Hanovre de 2011, le produit est à la fois un « observateur et un acteur » (« *an observator and a player* »). Le produit lui-même est censé être actif dans la régulation du processus industriel qui le fait aller d'ateliers en ateliers (par le biais de marquages, de capteurs)[71].

[70] Et de celles de leurs concepteurs, ce qui fournit un fort argument de dé-responsabilisation.

[71] A noter qu'à l'origine, cette perspective s'adjoint à celle de l'Internet des objets (IoT). W. Wahlster ne mentionne pas spécialement l'IA.

La comparaison tient essentiellement aux caractéristiques d'intelligence attribuées à ces modèles. Ils sont capables d'analyser des situations complexes, de résoudre des problèmes, de communiquer les résultats à un utilisateur ou à un autre dispositif chargé de l'appliquer. L'intelligence est vue sous le seul prisme cognitif. En cela, la métaphore du réseau de neurones joue pleinement son rôle de catalyseur d'une imagerie biologique du système d'IA. Il n'est pas rare de voir ces représentations de cerveau mi-organique mi-électronique[72]. Même des instituts de recherche reconnus jouent le jeu de ce rapprochement en le portant jusque dans leur logo, voir (Figure 8). Au travers d'une analyse de l'imagerie de l'IA déployée pour la communication scientifique (et souvent issue de banques d'images commerciales *stock*), A. Romele et M. Severo expliquent en quoi ces images ont un effet « anesthétique », tout à la fois anesthésiant et esthétique (2023:199) : elles suscitent l'émotion en annulant la réflexion, dressant ainsi une barrière pour la critique.

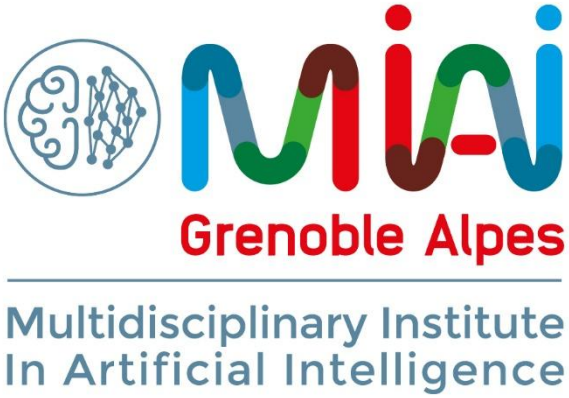


Figure 8 : Le logo du *Multidisciplinary Institute of Artificial Intelligence* de Grenoble, dont la chaire Ethique & IA coaccueille cette thèse. A gauche, un réseau de neurones est assimilé à l'un des hémisphères du cerveau.

Parfois, le système est placé dans une situation d'interaction humain-machine imitant une interaction sociale, à l'instar des agents conversationnels tels que ChatGPT. Cette interaction peut d'ailleurs réellement être sociale du point de vue de l'humain inconscient de la nature de son interlocuteur présumé. C'est sur cette prémisse que repose le test de Turing, le jeu de l'imitation, présenté dans son fameux article *Computing Machinery and Intelligence* (1950). A. Turing, considéré comme l'un des pionniers de l'IA, réfute la question de la capacité des machines à penser, qu'il juge peu pertinente. A la place, il décrit un problème de son invention, qui consiste à répondre à la problématique suivante : une machine peut-elle si bien imiter un être humain (à l'écrit) qu'un observateur en aveugle ne saurait distinguer ladite machine d'un humain ? Cette publication, régulièrement citée dans les introductions et initiations à l'IA, a plus tard été interprétée de façon à confondre le test de Turing avec un test d'intelligence, ce qui n'était pourtant pas l'objectif initial (Proudfoot 2011). La preuve de la pensée, de l'intelligence, et par extension de l'efficacité, a ainsi été associée à la capacité à imiter[73]. En retour, le discours s'est construit autour de

[72] A ce sujet, G. Le Lay a donné une présentation très éclairante lors de la journée d'étude *L'IA au prisme des SHS*, organisée en 2022 à l'EHESS par L. Conjard et C. Girard-Chanudet. Il y a notamment détaillé comment les représentations stylisées de cerveaux hybrides jouaient sur l'ambiguïté entre réseaux de neurones artificiels et réseaux de neurones biologiques, participant à l'émergence d'une nouvelle « mythographie » (au sens d'A. Leroi-Gourhan, c'est-à-dire la version visuelle de la mythologie). La thèse de G. Le Lay, en cours, porte sur la formation et l'enseignement en IA.

[73] L'argument a récemment rencontré de nouvelles difficultés. P. Tubaro et ses collègues (2020) ont montré comment certains systèmes prétendument d'IA dissimulent en fait le travail de salariés bien humains dont les

termes anthropomorphisant pour démontrer le caractère intelligent, et par extension efficace, des systèmes. La matérialisation de cette anthropomorphisation a été étudiée dans certains cas de figure impliquant l'usage de robots ou d'agents conversationnels, notamment au travers d'une méta-étude réalisée par M. Li et A. Suh (2021). Les chercheuses ont étudié la façon dont l'humanisation de ces systèmes orientait leur perception et leur adoption, du côté des utilisateurs. Elles ont en fait montré qu'il existait un large dissensus dans la littérature scientifique sur le caractère positif ou négatif de ce procédé. Autrement dit, la puissance du narratif humanisant est relativement incertaine en ce qui concerne les utilisateurs de ces systèmes : il reste à prouver qu'il est utile de concevoir des machines qui seraient semblables à des humains pour améliorer leur utilisation par les usagers. Mais ces derniers sont-ils vraiment les premiers ciblés par ces discours aux refrains anthropomorphiques ? C'est ce sur quoi nous pourrons nous interroger par la suite. Il nous semble que la réponse soit négative.

Des systèmes mieux que des humains (1 / 2) : fiabilité correctionnelle

Des événements marquants réactivent régulièrement l'attention collective sur la qualité des machines, sur leur caractère impressionnant. Parmi les plus marquants, on trouve justement des matches, des compétitions, des occasions pour l'humain de ferrailler contre la technique. Prenons deux cas de figure emblématiques : la victoire aux échecs de DeepBlue (IBM) face à Garry Kasparov en 1997 ou celle d'AlphaGo (DeepMind) face à Lee Sedol, alors champion du monde de go, en 2016. Ces événements, largement commentés et médiatisés, mettent en compétition des machines et des humains, et *a fortiori* les meilleurs humains dans leurs disciplines respectives. Ils sont autant de « véhicules narratifs » qui offrent l'occasion d'établir un discours de nouveauté, de rupture (Bory 2019:629). Les résultats de ces grands matches, comme ici à l'avantage des systèmes automatisés[74], poussent à une forme d'humilité collective, et assoient l'idée que la machine dépasse l'humain[75]. Un message fort est ainsi adressé aux acteurs économiques du monde entier, montrant que des tâches considérées comme complexes, réservées à une élite intellectuelle, peuvent dorénavant être réalisées par des systèmes algorithmiques. P. Bory (2019) explique que les deux matches évoqués se sont déroulés dans des contextes d'essor grandissant des marchés de l'ordinateur, d'une part, et de l'IA, d'autre part. En comparaison d'IBM, DeepMind (rachetée en 2014 par Google) a employé une stratégie originale, visant à présenter AlphaGo comme une entité immatérielle, surhumaine et insistant sur la fiabilité et la transparence de l'entreprise (en publiant autour du fonctionnement et des résultats d'AlphaGo). La promesse ne porte ici pas seulement sur les performances de l'IA, mais aussi sur l'intérêt de percevoir DeepMind comme un acteur incontournable et fiable dans le domaine de l'IA.

De telles comparaisons peuvent être mises en scène de façon abusive, notamment quand elles s'invitent dans le cadre professionnel (Crockett 2025). Dans son travail sur l'IA en radiologie, G. Gaglio montre que la comparaison humain-machine ne tient pas toujours compte des conditions réelles de travail des

tâches ne sont pas particulièrement automatisées. Les auteurs ironisent en dénonçant le vol du travail des machines par des humains.

74 Les défaites antérieures, comme celle de DeepBlue face à Garry Kasparov en 1996, sont moins l'occasion d'un épanchement sensationnaliste.

75 On retrouve ici le motif de la « honte prométhéenne » décrit par le philosophe G. Anders ([1956] 2002), qui évoque le sentiment d'humilité, voie d'humiliation, éprouvé par l'humain devant le sublime de la création technique.

professionnels[76]. Les propriétaires de logiciels, dans ce domaine, cherchent de plus en plus à attester scientifiquement de la fiabilité de leur outil. Il s'agit par exemple de systèmes de détection automatique de fractures, de tumeurs, qui analysent des images de radiographie, et qui renvoient des images de radiographie où les zones suspectes sont entourées. Pour montrer qu'ils fonctionnent correctement, les concepteurs mettent au point des études dont l'objectif est de mesurer la correction d'un dispositif, en général en comparaison avec un expert. C'est ainsi que l'on aboutit à des résultats du type : le système a raison dans 95% des cas, l'expert dans 90% des cas (chiffres inventés). Ces résultats permettent aux fabricants de justifier le recours aux systèmes de diagnostic, décrétés meilleurs que les experts, et constituent un argument de vente à part entière. L'un des problèmes ici, constate G. Gaglio, tient du protocole de ces expériences, qui mettent l'expert et le système dans des conditions similaires : l'analyse d'une radiographie seule. Or, cette situation n'est pas conforme à la façon dont travaillent réellement les radiologues, qui ont d'habitude accès à l'historique de santé du patient ou à d'éventuelles anciennes radiographies. Ils peuvent également s'entretenir avec le manipulateur ou le patient. Le scénario envisagé pour comparer l'expert et le système est donc faussé, d'autant que les résultats de laboratoire sont rarement aussi bons dans des cas réels. Pourtant, les résultats de ce type de comparaison caduque peuvent ensuite être librement diffusés, et valider un sentiment de supériorité technique. Autant qu'un techno-optimisme, ces interprétations révèlent une forme d'humano-pessimisme délétère (Crockett 2025).

Entrevue comme un enjeu mercatique et économique, l'exposition des performances des systèmes d'IA peut friser la malhonnêteté intellectuelle. C'est le cas d'un clip promotionnel de Google. En décembre 2023, la firme publie une vidéo de présentation de leur nouveau modèle, Gemini. Il s'agit d'un système multimodal, qui prend en compte aussi bien des entrées constituées d'images (le présentateur se filme en train de réaliser diverses actions, ou montre son écran), que de sons (la voix du présentateur). Le système semble pouvoir entretenir une forme de conversation avec son utilisateur, par le biais d'une voix de synthèse. Dans cette vidéo, au bout de quelques minutes, le présentateur exhibe successivement son poing fermé, puis deux doigts relevés, puis sa main aplatie : ce sont les trois possibilités offertes par la main pour jouer à Pierre, Papier, Ciseaux. Alors qu'il n'a pas fini ses enchaînements, le modèle répond



Figure 9 : A gauche, une capture d'écran de la vidéo promotionnelle de Google ; à droite, un extrait du billet de blog qui illustre la façon dont les résultats ont réellement été obtenus.

[76] Le résultat auquel nous faisons référence ici n'a pas été publié alors que nous écrivons ces lignes. G. Gaglio en a fait une présentation lors du colloque « Intelligence artificielle et transformations du travail », organisé par la chaire Ethique & IA (MIAI), qui a eu lieu du 20 au 22 novembre 2023, à Grenoble.

tout de go à ce flux vidéo « Je sais ce que tu fais ! Tu joues à Pierre, Papier, Ciseaux ! » [77]. Le résultat impressionne, les commentaires de la vidéo sont élogieux, et nombre de commentateurs y voient une étape supplémentaire vers la domination machinique. Pourtant, les équipes de Google ont pris le soin d'accompagner la vidéo d'un billet de blog expliquant certaines des coulisses de la réalisation de la vidéo (Chen 2023). On y découvre que l'interaction entre le présentateur et Gemini n'a pas eu lieu telle qu'elle a été diffusée. A la place, seules trois images (d'une main imitant respectivement la pierre / le papier / le ciseau) ont été envoyées, accompagnées d'une entrée supplémentaire « Que penses-tu que je suis en train de faire ? Indice : c'est un jeu[78]. ». C'est cette entrée qui provoque la réponse correcte du système, mais elle n'apparaît pas sur la vidéo promotionnelle, qui reproduit cette interaction comme si elle avait eu lieu sans indication particulière, en direct. Mais Google, pour faire meilleur effet, les a dissimulées – voir la (Figure 9) pour la comparaison.

Le procédé sert l'objectif de rendre ces dispositifs impressionnants, et donc de participer à l'édification d'une promesse de performance de l'IA. Ce type d'omission est typique d'une promotion de l'IA qui est invisibilise les modalités de production de l'IA, voir par exemple (Irani et Silberman 2013).

Nous ne cherchons pas à montrer, au travers de ces exemples, que les systèmes d'IA sont moins bons que ce que leurs concepteurs prétendent qu'ils sont[79]. En revanche, on peut constater que la démonstration de l'efficacité prend une place importante dans la promotion des technologies d'IA. Ces démonstrations ont déjà été analysées par des travaux de sociologie des techniques qui ont souligné qu'elles sont l'occasion de mises en scène où l'objet technique en lui-même se trouve mis de côté ; ironiquement, il n'est parfois pas même montré (Simakova 2010). Dans le monde industriel, l'impression d'efficacité *a priori* est renforcée par la croyance répandue d'une supériorité itérative et naturelle des nouvelles technologies par rapport aux précédentes (Tortorella et al. 2023). En outre, la comparaison avec l'humain est clé, car elle peut justifier la dégradation du statut d'un emploi, d'un métier, dont les tâches se trouvent être désormais à portée de la technologie – tout en faisant fi, le plus souvent des conditions réelles d'utilisation de ces technologies. Le statut des métiers de la traduction, par exemple, est fortement touché par la banalisation du recours aux dispositifs d'IA générative, désormais en libre accès sur Internet[80].

Des systèmes mieux que des humains (2 / 2) : fiabilité objective

Un autre plan sur lequel les systèmes d'IA surpasseraient les humains est celui du jugement, et plus particulièrement de la capacité à rendre un jugement objectif. Voilà comment se déploie le raisonnement :

---

[77] La vidéo est visible sur YouTube à ce lien : *https://www.youtube.com/watch?v=UIZAiXYceBI*. La partie qui concerne « Pierre, Papier, Ciseaux » commence à 2:45. Phrase originale « I know what you're doing! You're playing Rock, Paper, Scissors! » (notre traduction).

[78] « What do you think I'm doing? Hint: it's a game » (notre traduction).

[79] L'adjectif « bon » ici, est un peu provocateur, il ne faut pas l'entendre du point de vue moral ou objectif, mais plutôt comme une évaluation à grands traits.

[80] La Société Française des Traducteurs, syndicat professionnel représentant les métiers de la traduction, a pris position en juin 2024. Si elle n'est « n'est pas opposée à [l']intégration [de l'IA générative] aux métiers de la traduction et de l'interprétation », elle « demande » notamment « le partage équitable de la valeur créée par les services linguistiques et dénonce la baisse de rémunération ainsi que la dégradation des conditions de travail de professionnels hautement qualifiés, alors que le marché global ne cesse de croître » (Société Française des Traducteurs 2024).

les machines sont des objets inertes qui fonctionnent selon les lois de la physique et des mathématiques, or de tels objets n'ont pas de subjectivité, donc les machines produisent des résultats objectifs. L'argument est celui de « l'objectivité mécanique » (Daston et Galison 1992), illustré par l'ambition des fabricants d'atlas du XIXème de produire des images au plus proche de la réalité, dépourvues de toute interprétation ou erreur humaine subjective. De ce point de vue, l'arrivée de la photographie est ainsi une victoire épistémologique de l'objectivité mécanique. Celle-ci est alors le produit, expliquent L. Daston et P. Galison, d'une soustraction de soi dans la représentation. La photographie représenterait le réel, indépendamment de toute subjectivité, et en particulier de celle du photographe. Quand bien même, une photographie résulte du choix d'un sujet, d'un cadrage, d'un lieu, d'une lumière. La critique de l'objectivité mécanique apparaît ainsi assez triviale. Pourtant, comme on va le voir, ses postulats perdurent dans d'autres champs technoscientifiques, en particulier en IA.

Sur le principe, l'objectivité mécanique paraît permettre de caractériser les programmes informatiques. Ils forment des suites d'instruction purement mathématiques qui viennent indifféremment traiter des entrées et donner des résultats. Pourtant, même avec des algorithmes purement déterministes (qui ne relèveraient sans doute pas de l'IA connexionniste), les modalités d'élaboration de ces systèmes semblent montrer, explique E. Schmitt (2016), qu'il ne s'agit pas tant d'un processus froid et logique que d'un travail d'expertise qui nécessite des arbitrages.

A l'aube des années 2010, un éditorial du rédacteur en chef du magazine *Wired*, C. Anderson (2008), réapplique ce principe d'objectivité mécanique aux données et fait grand bruit en annonçant la « fin de la théorie ». La masse des données collectées continuellement, qu'elles soient issues de capteurs, de relevés comptables ou administratifs, serait si dense et exhaustive, qu'elle permettrait à elle seule de décrire le réel. « Les nombres parlent d'eux-mêmes », écrit C. Anderson. Cette position a été vivement critiquée pour son mépris du caractère construit des bases de données (boyd et Crawford 2012), ou encore de l'incapacité à établir des liens de causes à effet à partir de seules corrélations (Calude et Longo 2017), mais a sans doute fourni un terreau fertile pour le mouvement des mégadonnées (ou *Big Data*), qui figurent également à l'agenda de K. Schwab ([2016] 2017).

A notre connaissance, peu d'études ont été produites pour estimer les modalités de diffusion des idées d'objectivité et de neutralité prétendues des systèmes d'IA[81]. Cela n'empêche pas l'argument de l'objectivité d'être férocement combattu, d'abord par les sciences sociales, avant que la critique ne soit progressivement intégrée par les concepteurs de ces outils. La critique internaliste se structure autour du concept de biais (Bender et al. 2021). Des affaires largement médiatisées ont participé à lui donner de l'importance, comme la polémique liée à l'utilisation du logiciel de prédiction de récidive COMPAS, utilisé par la justice étasunienne, et décrié pour sa discrimination des personnes noires (Angwin et al. 2016; Beaudouin et Maxwell 2023). La définition des biais n'est pas tout à fait stabilisée (Davat 2023) : le terme renvoie à l'idée d'un décalage subjectif entre (1) les résultats d'un algorithme et (2) ce qui aurait pu être attendu dans un cas idéal. Sous ce prisme, c'est systématiquement l'humain qui est à blâmer : les données ne sont pas de bonne qualité, ou ont été mal annotées, ou ne sont pas représentatives de la population ciblée, *et caetera*. Les biais algorithmiques font l'objet de taxonomies variées qui cherchent à

[81] En guise de contre-exemple, une étude portant sur les médias britanniques montre que les journalistes produisent régulièrement des représentations de systèmes d'IA qui seraient dépourvus de subjectivité (Brennen, Howard, et Nielsen 2022).

les délimiter, les catégoriser (Van Giffen, Herhausen, et Fahse 2022). Pour les réduire, voire les résoudre, l'un des angles d'attaque est celui de l'inclusivité et de la représentativité, compte tenu des risques de discrimination induits par l'usage des systèmes d'IA (Buolamwini et Gebru 2018).

Le terme de biais fait lui-même l'objet d'une critique (Davat 2023). Il présuppose en effet une capacité à débiaiser, c'est-à-dire à corriger une erreur qui serait intrinsèquement humaine, pour atteindre une norme objective implicitement attendue. Pour A. Davat, le concept de biais charrie avec lui une ambition techno-solutionniste qui met de côté le caractère situé des données, des algorithmes, et de leur conception. Débiaiser, en effet, ce ne serait que re-biaiser d'une façon convenable selon un certain point de vue, mais toujours partial.

Le champ des études sur l'équité algorithmique (la *fairness*) en est un exemple. Il est l'un des chevaux de bataille de l'éthique internaliste de l'IA, débattue par les chercheurs en IA eux-mêmes. La *fairness* se traduit en une multiplicité de mesures potentielles qui explorent différentes manières d'envisager en quoi un système algorithmique pourrait être injuste ou discriminatoire (Binns 2018). Le problème tient en fait dans l'incapacité à satisfaire simultanément les critères majeurs de *fairness* (Corbett-Davies et al. 2016; Kleinberg, Mullainathan, et Raghavan 2016) : un système pourrait être équitable selon une définition A, mais inéquitable selon une définition B, alors même qu'elles sont toutes les deux reconnues. Dès lors, les choix de conception forcent à un arbitrage dans un sens ou dans un autre. Le risque est inévitable de générer des inégalités de traitement, mais il est inhérent à ces dispositifs algorithmiques dans des situations d'usage où ils affectent la vie sociale.

Des systèmes au-delà de toute compréhension humaine

Comme nous avons tâché de le montrer, la mise en valeur des systèmes d'IA passe par le témoignage de leur similarité et de leur supériorité par rapport à l'humain sur le plan de l'efficacité dans la réalisation de tâches, et de l'objectivité. Ces discours tendent à placer les dispositifs d'IA et les individus sur une même échelle de performance grâce à laquelle ils peuvent être comparés. Mais d'autres discours sont l'occasion, au contraire, d'envisager une profonde divergence de nature.

« *Ça marche, mais on ne sait pas pourquoi* » est un motif régulier du discours sur l'IA, énoncé même par des chercheurs du domaine et des développeurs (Knight 2017). L'énoncé tient à l'opacité des outils (Burrell 2016). Les réseaux de neurones mobilisent des fonctions non-linéaires, en très grand nombre, qui rendent caduque tout raisonnement purement causal. Même à des niveaux de complexité relativement faibles, les calculs s'opèrent dans des espaces à haute dimension qui rendent leur représentation difficile. En outre, les codes sont souvent cachés pour des raisons économiques et / ou de confidentialité (Burrell 2016) ; cachés à leurs utilisateurs mais aussi parfois à ceux qui collaborent à leur conception (Lange 2016). Ils peuvent de toute façon être si longs et enchevêtrés qu'il est difficile d'en avoir une image générale en tête. Le tout rend difficile la possibilité d'avoir une vue d'ensemble du fonctionnement de ces systèmes. Le découplage entre l'optimisation des modèles et la supervision par leurs développeurs limite la compréhension générale des opérations à l'œuvre, ainsi que la possibilité de les rendre facilement compréhensibles. L'explication ne peut plus qu'être approximation (Miller 2018).

L'argument, qualifié de « drame algorithmique » dans la littérature (Ziewitz 2016), dissimule en réalité une incohérence : en réalité, les développeurs savent très bien pourquoi ils ne savent pas. Les raisons de

cette opacité sont bien connues, et sont intrinsèques à l'apprentissage machine. Etant donnés les problèmes que sont supposés résoudre ces modèles et les méthodes utilisées, l'opacité n'est pas une conséquence malheureuse, elle est structurante des activités de l'apprentissage machine (Pégny et Ibnouhsein 2018). A. Campolo et K. Crawford (2020) ont développé le concept de « déterminisme enchanté » (*enchanted determinism*) pour mettre en lumière ce paradoxe. D'un côté, les promoteurs de l'IA assurent que ces systèmes sont effectivement capables de repérer des motifs dans des données, d'atteindre des hauts niveaux de performance, alors que, dans le même temps, ils mobilisent un autre discours, celui de la magie, pour expliquer cette efficacité technique.

Il peut paraître étonnant que l'un des registres souvent déployés pour justifier l'efficacité des systèmes techniques soit celui de la magie[82] (Elish et boyd 2018). Décrire un système comme *magique* pourrait dégrader son image auprès des industriels : combien d'entre eux s'appuient sur la magie ? Mais, au contraire, les promoteurs de l'IA comptent sur la forte impression que constituent les résultats des systèmes, qui apparaissent rapidement, sans effort, d'un clic, en tous cas d'une façon qui étonne pour qui n'est pas habitué ou ne dispose pas d'une littératie suffisante[83]. M. Elish et d. boyd citent l'anthropologue A. Gell (1988) qui a lui-même travaillé sur le rapport entre technologie et magie. Le motif de la magie, selon A. Gell, souligne la simplicité, le peu de coût nécessaire à réaliser l'activité impliquant la technologie : *c'est magique, c'est facile*[84]. En invisibilisant la difficulté inhérente au déploiement des systèmes d'IA, ce discours de la magie réduit les obstacles nécessaires à leur introduction dans des espaces professionnels. Tout paraît plus simple. Au-delà du pure narratif, l'imagerie de la magie (couleur violette, forme étoilée) est vastement mobilisée dans les nouvelles fonctionnalités d'IA de logiciels grand public, comme le montre le travail critique du collectif de recherche Limites Numériques (Maudet, Beignon, et Thibault 2024). Le discours de la magie est en outre déresponsabilisant, car il autorise les vendeurs d'IA à plaider, de prétendue bonne foi, qu'un résultat inattendu n'est pas de leur fait, mais est simplement inhérent à la complexité de l'outil. L'erreur occasionnelle, surprenante (et donc aux répercussions potentiellement importantes) devient le légitime prix à payer pour une ingéniosité de tous les (autres) instants.

Ce dont on s'aperçoit, c'est l'existence d'une tension entre le caractère humain et anthropomorphisé attribué aux systèmes d'IA d'une part, et leur inhumanité technique, de perfection machinique d'autre part. La promesse englobant ce paradoxe apparent concerne en fait la facilité d'intégration de l'IA dans la société. Il s'agit de promouvoir des systèmes fiables, fiables parce qu'ils ne sont pas si différents des

[82] A. Campolo et K. Crawford (2020) donnent un exemple prononcé par Stuart Russell, informaticien reconnu et influent dans le domaine de l'IA (K. Schwab ([2016] 2017) le cite), dans un entretien (Ford 2018),: « Nous commençons tout juste à avoir une compréhension théorique de quand et pourquoi l'hypothèse du *deep learning* est correcte, mais dans une certaine mesure, c'est encore une sorte de magie, parce que ça ne devait pas forcément se passer ainsi. Il semble qu'il y ait une propriété des images du monde réel, et qu'il y ait quelque propriété du son et des signaux sonores et oraux dans le monde réel, tels que quand vous connectez ce genre de données à un réseau profond, il est relativement facile d'apprendre un bon [modèle] prédicteur. Mais pourquoi, cela reste à découvrir » (notre traduction).

[83] Une étude récente suggère par exemple une corrélation entre une faible littératie dans le domaine de l'IA, et la propension (*a priori*) à l'adoption de ces systèmes, bien que les résultats soient à nuancer selon le type de tâches considérées (Tully, Longoni, et Appel 2025). L'article établit un lien entre la bonne réception à ces systèmes et leur caractérisation comme étant « magiques ».

[84] Comme le note A. Gell, cette simplicité est purement illusoire, et c'est d'autant plus le cas lorsqu'il s'agit de systèmes d'IA, qui ne pourraient exister sans une infrastructure technologique mondialisée et complexe.

humains, mais aussi fiables parce qu'ils fonctionnent d'autant mieux qu'ils n'auraient pas leurs limites physiques, cognitives ou subjectives. Dans l'environnement industriel, la promesse de fiabilité est un argument de taille pour envisager le déploiement d'outils, parce qu'elle fait décroître l'incertitude, et accroît dans le même temps le sentiment de maîtrise des processus industriels.

2.b. Augmenter l'industrie, la promesse économique

L'IA comme avantage compétitif

La ruée des entreprises vers l'IA a débuté, et notamment dans l'industrie[85]. Comme nous l'avons vu, l'IA est porteuse d'une promesse d'efficacité, de fiabilité, qui est alimentée par ses promoteurs autant que par l'imaginaire qu'elle mobilise[86]. Dans le monde industriel, cette efficacité relative permet d'envisager une production de meilleure qualité, de meilleurs rendements, en bref, une possibilité de faire refluer l'essor économique. Parmi les mots d'ordre du paradigme du renouveau industriel figurent la réactivité, la personnalisation et la flexibilité de la production (Blanchet 2016). A ces principes, on peut en ajouter un quatrième, peut-être moins assumé, celui de la surveillance et du contrôle, voir (Figure 10). L'idée générale est celle d'une meilleure maîtrise des flux de production et d'une réduction de l'incertitude. Nous nous proposons d'examiner ces quatre principes en citant les intérêts du déploiement de l'IA pour chacun[87], et en voyant comment ils sont l'aboutissement de différentes suppressions prétendues de barrières organisationnelles et économiques.

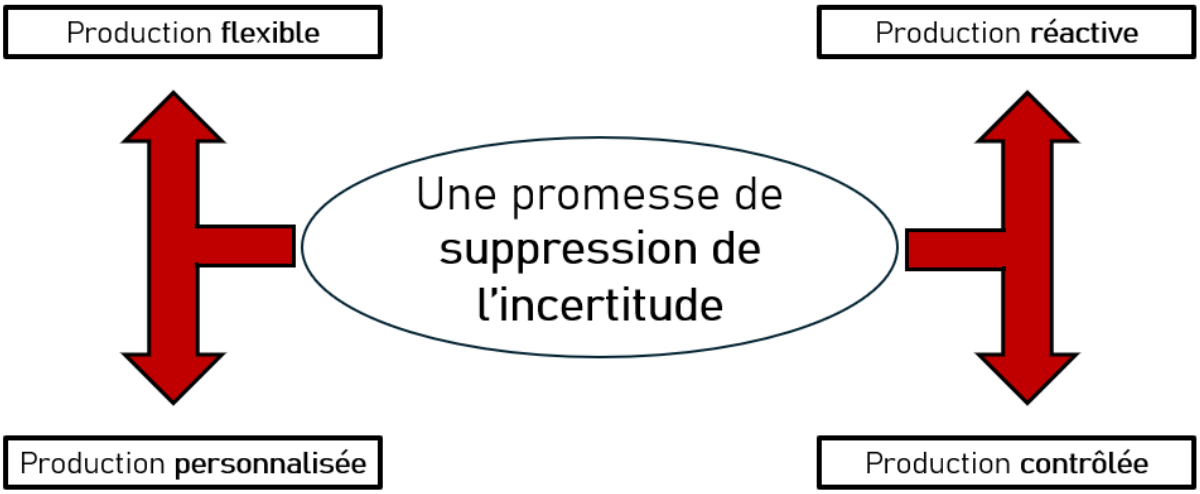


Figure 10 : Les quatre promesses de suppression de l'incertitude dans l'*Industrie 4.0*.

Une production réactive : supprimer les aléas

Une première ambition est celle d'augmenter la réactivité des processus industriels. Par réactivité, on entend une capacité à réaliser des modifications opérationnelles rapides sur les chaînes de production

[85] Après plusieurs années de stagnation autour de 50 à 58%, le taux d'adoption de systèmes d'IA aurait bondi à 72% (Singla et al. 2024). Ce chiffre, élevé, concerne l'ensemble du monde, les entreprises sélectionnées sont supposées représentatives en termes de taille, de région et de secteur. De tels résultats étonnent quand, dans le même temps, en France, moins de 20% des entreprises (avec une sur-représentation du secteur industriel) se seraient dotées de systèmes d'IA (Condé et Ferguson 2023).

[86] Certains acteurs peuvent mettre en doute, chiffres à l'appui, les bénéfices apportés par la numérisation de l'industrie. Mais comme le note T. Reverdy (2021:35), l'argument peut être retourné en utilisant l'exemple d'Amazon : à des pertes initiales peuvent succéder de très importants profits. Il écrit : « L'incapacité à calculer le bénéfice économique des investissements technologiques est exploitée comme un argument en faveur de ces investissements. »

[87] Ces termes ne sont pas nécessairement stabilisés, ni prédominants, dans la littérature en génie industriel, nous nous en servons ici purement dans un objectif pédagogique afin de balayer un éventail de transformations productives et l'usage de l'IA dans ces contextes.

suite à des changements dans la demande (Dos Santos et al. 2020). Le rapport au temps est essentiel dans les industries, qui reposent sur des chaînes logistiques complexes. L'organisation du travail est totalement tournée vers cette optimisation de la durée des actions et des déplacements. La rationalisation du travail s'est par exemple construite autour du principe du « juste-à-temps », née dans l'industrie automobile via le modèle toyotiste (Neuville 1995). Dans une telle perspective, la réduction des stocks doit s'allier sur le principe avec une réduction des aléas, explique J.-P. Neuville.

Le principe de réactivité cherche justement non pas à réduire les aléas, mais plutôt à les traiter le plus rapidement possible, de sorte que ces aléas disparaissent simplement du champ de la conscience collective. Il s'agit de traiter des risques de bris (de la production ou de machines), d'interruptions logistiques ou à l'inverse de surcharge temporaire des flux de production. En repérant et en traitant des anomalies plus rapidement, la qualité et la quantité globales de la production sont améliorées. Pour que la fluidité des processus soit générale, elle doit sur le principe s'étendre sur l'ensemble de l'appareil productif, puisqu'une action à un endroit donné peut conduire à une réaction à un autre endroit.

Un flux industriel plus réactif donne la possibilité de ne plus avoir besoin d'une surveillance humaine aussi importante qu'auparavant, puisque la veille serait assurée par des machines. Avec une production réactive, la dépendance aux interventions humaines pour effectuer des tâches urgentes peut décroître ou non. Certaines interventions paraissent en effet difficiles à automatiser. La réactivité répond aux exigences de la culture du « zéro défaut », qui impose de détecter les anomalies le plus rapidement possible tout en identifiant leurs origines (Crosby 1979).

Parmi les solutions techniques envisagées reposant sur l'IA, on compte des outils de classification (à partir de signaux visuels ou vibratoires par exemple) qui repèrent des défauts présents sur certaines pièces. Des systèmes algorithmiques plus classiques, peuvent aussi piloter des actions suite au déclenchement de seuils calibrés en amont, ou bien assurer le transit des systèmes de transport automatisés, comme les AMHS[88]. La mise à disposition d'interfaces adaptées, basées sur des codes-couleur (vert, jaune, rouge) peut guider l'utilisateur. De telles technologies tentent de minimiser la durée entre la survenue d'un problème et sa détection, puis entre sa détection et sa résolution, mais la demande de réactivité peut également faire suite à des changements dans les commandes.

Une production flexible : supprimer les interruptions

Un deuxième objectif consiste à accentuer la flexibilité des processus industriels. Le terme englobe des idées disparates, nous nous concentrerons ici sur l'intérêt que revêtent les technologies de la quatrième révolution industrielle pour la planification des activités (Bueno, Godinho Filho, et Frank 2020). L'automatisation du travail productif va de pair avec une volonté de maîtrise. Celle-ci nécessite une capacité de reprise de contrôle des machines. Le raccordement (analogique ou numérique) des systèmes techniques à de larges réseaux, qui sortent parfois de la salle de production, permet de vérifier le bon fonctionnement de l'appareillage technique. Repérés par ce biais, des événements inopinés peuvent justifier l'interruption des processus industriels. Des interruptions sont également à prévoir lors des

[88] AMHS pour *Automated Material Handling Systems*, systèmes automatisés de transport de matériels. Dans l'industrie du semiconducteur il s'agit par exemple de boîtes circulant sur des rails fixés sur le plafond, et munies d'outils de préhension pour poser et récupérer des lots sur des postes de gravure ou de contrôle.

activités de maintenance : les chaînes de production qui tournent en continu doivent en effet pouvoir être inspectées. La procédure standard est celle de la maintenance préventive (Héng 2023) : à intervalles réguliers, des interventions systématiques sont planifiées pour pouvoir vérifier le bon fonctionnement des machines.

Depuis récemment, des systèmes d'IA sont désormais déployés pour basculer vers une politique de maintenance prédictive (Blanchet 2016). Des jeux de capteurs sont couplés à des systèmes disposant de modèles physiques et / ou historiques capables d'analyser les données collectées, par exemples des données vibratoires (Thomas 2012). De telle façon, ces systèmes peuvent estimer la défaillance à venir d'une machine particulière[89]. L'objectif de la maintenance prédictive est de minimiser le temps d'interruption de la machine (et donc la perte de production) tout en maximisant sa longévité (Achouch et al. 2022). Sous ce prisme, les interventions n'ont plus lieu que lorsqu'elles sont nécessaires. Ce sont donc tout autant les processus productifs qui se verraient flexibilisés (car interrompus et modulés) que les plannings des équipes de maintenance, qui, à partir d'alertes, devraient planifier leur intervention dans les heures ou jours à venir.

Une production personnalisée : supprimer le désintérêt

Une troisième ambition concerne la personnalisation de l'industrie. On peut distinguer deux angles pour l'envisager : la personnalisation des objets, et la personnalisation des services. Pour ce qui concerne la personnalisation des objets produits, comme l'explique M. Blanchet (2016), de nombreuses machines, parce qu'elles sont paramétrables, peuvent réaliser une large diversité d'actions, ou fabriquer des produits variés, selon les commandes qui leur sont adressées. La production peut ainsi être diversifiée et adaptée aux attentes des clients. Il est désormais possible de satisfaire des besoins ponctuels, de répondre aux demandes du marché de façon rapide. Au « juste-à-temps » s'ajouterait désormais le « juste-à-ton-goût ». La promesse de l'*Industrie 4.0* est en ce sens d'ouvrir une ère de la « personnalisation de masse » (Wang et al. 2017).

Les techniques de fabrication additive (imprimante 3D par exemple) sont emblématiques d'un tel paradigme en ce qu'elles peuvent produire des objets radicalement différents selon les fichiers de commandes fournies[90]. Dans l'industrie du semiconducteur en particulier, on peut également penser aux dispositifs de gravure qui peuvent réaliser différentes opérations sur les *wafers*, moyennant un travail important de calibration des machines. La forte dépendance des entreprises à leurs clients (et notamment pour les fournisseurs et sous-traitants) encourage également à une personnalisation du service. Cette personnalisation n'est pas tant celle de séries d'objets particuliers, elle concerne aussi des machines ou logiciels qui permettent de les produire. Des collaborations étroites se nouent autour de la conception de systèmes adaptés aux demandes des clients, en visant à une « amélioration continue » héritée de Toyota (Pardi 2015). La conception itérative de l'IA s'inscrit parfaitement dans de telles démarches : la

[89] Par exemple, certaines machines se mettent à vibrer selon des fréquences différentes lorsqu'elles s'apprêtent à rendre l'âme.

[90] Un rapport du Conseil Supérieur de la Propriété Littéraire et Artistique (rattaché au ministère de la Culture), rappelle que les techniques de fabrication additive, démocratisées dans les années 2010, avaient été conçues dès les années 1980. Elles ne sont donc pas à proprement parler nouvelles au moment de la diffusion du discours de *l'Industrie 4.0*. Leurs utilisateurs ont bénéficié de l'expiration successive de plusieurs brevets, ce qui a contribué à leur démocratisation (Japiot et Lignereux 2016).

personnalisation du service est celle de la personnalisation de l'activité des machines, modelables (dans une certaine mesure) selon les souhaits des clients.

Une production contrôlée : supprimer la marge d'erreur

Un dernier curseur qui est réhaussé par le renouveau industriel est celui du contrôle, aussi bien de la production que des salariés. Dans les années 2010, le gain d'intérêt autour des données et notamment des mégadonnées (*Big Data*) a encouragé la massification de la production de données grâce aux systèmes numériques existants. Ces données sont variées : elles peuvent émaner de capteurs sur les lignes de production, de fichiers de registre (*log files*) mais aussi des marchés financiers ou des réseaux sociaux (Lyko, Nitzschke, et Ngonga Ngomo 2016). L'un des facteurs de cette course à la donnée tient de l'idée reçue que disposer d'une abondance de données équivaudrait à un meilleur contrôle des processus. Mesurer reviendrait à connaître. Cette vision néglige cependant les phases de traitement et de réflexion autour de l'usage de ces données, nécessaires à les intégrer de façon efficace aux processus organisationnels (Tortorella et al. 2023). L'emphase mise sur les données a pu donner une prééminence à leur intérêt propre avant de considérer dans quelle mesure leur usage serait bénéfique. L'un des moyens de mettre à profit ces données est la construction de jumeaux numériques (*digital twins*) qui sont des modèles numériques représentant une machine, un processus, voire une usine (Javaid, Haleem, et Suman 2023). Virtuels, mis à jour en temps réel, ces jumeaux numériques fournissent une image exhaustive de processus productifs qui peuvent être physiquement éloignés de leurs opérateurs. Leur fonctionnement repose sur l'hypothèse d'une compatibilité entre les mesures, leur interprétation, et la réalité. Tout n'étant pas toujours mesurable, la non-quantification de certains paramètres et l'absence de visuel de la machine réelle, physique, peut cependant fausser l'interprétation qui est faite grâce au jumeau numérique seul, d'où l'intérêt d'une vérification en présentiel. Malgré tout, la possibilité d'installer les capteurs en réseau et en masse ouvre des possibilités d'utiliser l'IA, notamment dans le domaine du contrôle qualité. Qu'ils prennent seuls les décisions ou non, les systèmes d'IA appliqués au contrôle de défauts assurent au moins la possibilité de ne plus surveiller qu'un échantillon de la production, mais bien son entièreté.

Ce contrôle de la production s'accompagne d'un contrôle de l'action des salariés. La mise à disposition de logiciels capables de sauvegarder chaque action promet à l'entreprise de pouvoir enregistrer et vérifier les décisions prises par les salariés[91]. L'un des objectifs est celui de la traçabilité des activités en cas de problème, mais d'autres usages sont relatifs à la justification des interruptions, au forçage de certaines actions au détriment de la volonté des opérateurs (Moro et al. 2019). Grâce aux technologies de l'*Industrie 4.0* travail des salariés peut être scruté à distance de façon plus fine et à leur insu, sur le mode du Panoptique imaginé par le philosophe Jeremy Bentham (*il est possible d'être vu à tout moment, sans que l'on puisse savoir quand exactement*).

[91] Dans la restauration rapide, de tels systèmes sont déjà mis en place pour surveiller les salariés de façon intensive (Shrivastava 2024). Ils sont par exemple utilisés pour vérifier que des pizzas disposent des bons ingrédients (Domino's), mais aussi, plus récemment, pour analyser les conversations entre clients et employés afin de détecter (et récompenser) les cas où ces derniers auraient réussi à vendre des suppléments aux clients (Dairy Queen).

Le nouvel espoir du capitalisme ?

Derrière ces évolutions de l'appareil productif (plus réactif, plus flexible, plus personnalisable, plus surveillé) se révèle une ambition parfaitement productiviste, qui cherche à augmenter toujours plus la quantité tout en minimisant la perte de qualité.

Plusieurs critiques développées depuis un prisme marxiste viennent étayer cette idée. Malgré son vernis parfois social, le discours de l'*Industrie 4.0* est indissociable d'une volonté de perpétuation de la création et de l'échange de valeurs marchandes grâce aux technologies, ce que C. Fuchs (2018) relie au concept de « capitalisme numérique ». Les élans de disruption, de grand chambardement, associés au renouveau industriel, se confondent avec une ambition continuiste qui ne remet pas en question les fondements du système productiviste. Au fond, du point de vue économique, la quatrième révolution industrielle sert à maintenir l'assurance (ou l'illusion) de pouvoir faire *comme avant* – ce qui serait peut-être le plus grand paradoxe d'une révolution. Le risque, selon ces critiques, serait de laisser la question du développement technologique aux mains d'une hégémonie capitaliste qui ignorerait les enjeux socio-économiques contemporains (Savul 2020).

Pourrait-il en être autrement ? Une alternative idéologique associant *Industrie 4.0* et IA est difficile à imaginer[92]. L'histoire de l'IA elle-même est étroitement intriquée avec celle du capitalisme et du néo-libéralisme. Dans l'histoire qu'il propose des réseaux de neurones, P. Jensen (2021) s'étonne de voir chez F. Rosenblatt (1958), le pionnier du perceptron (l'ancêtre technique des réseaux de neurones), des références à l'économiste néolibéral Friedrich Hayek. Le parallèle, reconstruit par P. Jensen, est le suivant. D'un côté, les réseaux de neurones artificiels adaptent leur paramétrage durant leur apprentissage face à la complexité des signaux qui leur sont présentés. De l'autre, selon la théorie de Friedrich Hayek, les prix se régulent au cours des interactions spontanées entre acteurs économiques entre offre et demande. Cette liberté supposée s'oppose à une planification considérée comme rigide par la pensée libérale, et qui trouve son pendant numérique dans l'IA symbolique, fondée sur des règles de décision préétablies. Pourtant, comme le note P. Jensen, la pensée de Friedrich Hayek justifie des tendances autoritaires à la subordination aux règles du marché, qu'il ne faudrait pas éprouver. Il y a ainsi dans les méthodes d'apprentissage profond un héritage conceptuel duquel découle une obsession pour l'optimisation de fonctions qui ne tient compte que de variables objectivées, quantifiées, sans prise en compte de facteurs sociaux extrinsèques. En outre, ces réseaux ne laissent pas de place à l'incertitude, au doute, en bref à la délibération collective : quoiqu'il arrive, le perceptron enverra un signal de sortie.

Plus en amont historiquement, le projet de la machine analytique (*Analytical Engine*) de Charles Babbage, auquel a contribué théoriquement Ada Lovelace, porte en lui les germes d'une mécanisation du travail mental, après que les machines du XIXème aient participé à mécaniser le travail physique (Pasquinelli 2023). La machine analytique, imaginée mais jamais achevée, est régulièrement citée comme étant l'une des inspirations des ordinateurs développés à partir de la moitié du XXème siècle, dans le contexte de la

[92] Certaines critiques contemporaines de la « numérisation du monde », héritières de J. Ellul, considèrent que le numérique (même sous sa forme alternative : logiciel libre, smartphone équitable) n'est pas compatible avec la poursuite d'une société désirable (Laïnae et Alep 2020). L'IA, sous sa forme la plus promue aujourd'hui, nécessite une infrastructure numérique colossale, et semble en outre difficile à envisager sous le prisme de la convivialité cher à I. Illich (Couillet et al. 2022).

Seconde Guerre mondiale. L'automatisation du travail telle qu'elle est envisagée par Charles Babbage revient à calculer les coûts du travail, selon M. Pasquinelli, car elle permet d'attribuer à chaque tâche un ensemble de ressources matérielles nécessaires à l'effectuer. Il est ensuite possible d'estimer la valeur marchande de ces ressources. En cela, toute pratique d'automatisation est en théorie une manière d'optimiser des coûts, de gagner au change. Là encore, le travailleur est une variable d'ajustement.

Dans ses fondations théoriques techniques et conceptuelles, l'IA est ainsi pleinement concevable comme étant une manière d'assister l'ouvrage capitaliste. En cela, le lieu commun qui énonce que *le problème n'est pas l'IA mais ce que l'on en fait* semble éculé. La promesse de l'IA intégrée au récit du renouveau industriel peut être interprétée comme l'annonce d'une poursuite de certains rapports de force économiques existants. L'IA constituerait ainsi une possibilité technique de rassurer les acteurs de l'innovation et leur permettre d'entrevoir une nouvelle voie de prospérité tout en réutilisant des recettes économiques déjà éprouvées. L'entreprise n'est pas gagnée d'avance. Comme le rappelle J. S. Carbonell (2022:44), « [l]'Industrie 4.0 et la prétendue révolution digitale se heurtent […] à un problème classique de l'investissement de l'innovation, dans une économie capitaliste stagnante : les gains qu'elle permet sont trop faibles compte tenu des investissements exigés. » Ces difficultés expliquent sans doute la grandiloquence des promesses qui portent sur l'intérêt de l'IA du point de vue économique, et de celui du travail.

2.c. Libérer le travail, libérer du travail

La question du travail est centrale lorsqu'on étudie l'intégration de l'IA à la vie sociale. Le travail cristallise un ensemble de croyances pessimistes, optimistes qui sont plus ou moins connectées aux pratiques réelles de l'IA en contexte professionnel. Nous souhaitons montrer qu'il existe une ambiguïté autour des promesses faites autour du travail.

On peut distinguer deux grands types de visions qui se différencient selon la logique d'incrustation du système automatisé dans l'organisation du travail. La première témoigne d'une pure destruction du travail, au travers de la thématique du remplacement par la machine, dans la foulée des théories schumpéteriennes de l'innovation. La seconde envisage la libération du travailleur du joug de certaines tâches, qui seraient effectuées par les machines, de façon à gagner en temps et en épanouissement.

Substituer les travailleurs

Une première promesse en forme d'avertissement est celle du remplacement. Cette promesse découle directement des deux promesses auxquelles nous avons dédié les précédentes sous-sections. Les machines, devenues si efficaces, et si pertinentes d'un point de vue économique, remplaceraient tout simplement les travailleurs humains. Cette proposition, radicale, est empreinte d'une vision techno-solutionniste qui voit en certains systèmes d'IA le parfait substitut de salariés humains. Nous avons déjà évoqué brièvement ce type de récit qui a affecté le domaine de la radiologie à partir de 2016 (Arena, Gaglio, et Vayre 2022).

Une ambiguïté peut subsister dans le terme de *remplacement* : dans quelles conditions s'opèrerait-il ? Il faut ici distinguer une vision déterministe (remplacement par les machines, mécaniquement amenées à se substituer aux salariés) et une vision contingente (remplacement par les dirigeants, qui choisissent de substituer aux salariés les machines). Ces visions renvoient à des conséquences semblables. D'un point de vue analytique cependant, elles ne donnent pas à voir des phénomènes identiques, puisque les causes du remplacement ne sont pas les mêmes. Souvent, par métonymie, la seconde est comprise comme la première : c'est cette version déterministe (et qui écarte ainsi toute responsabilité des employeurs) que nous examinons ici.

La thèse du remplacement a été notamment remise au goût du jour par une étude initialement parue en 2013, et qui jugea que 47% des emplois étasuniens avaient une forte probabilité d'être automatisés par des équipements pilotés par ordinateurs dans les dix à vingt ans à venir (Frey et Osborne [2013] 2017). Cette étude a eu un formidable écho, bien au-delà des sphères académiques. Elle a participé à prolonger la réactivation du « spectre du chômage technologique » initié par la diffusion des techniques de l'informatique et de la programmation à la fin du XXème siècle (Jarrige 2014). Cette étude a été rapidement contestée, notamment en lui reprochant de considérer chaque métier comme un bloc de tâches monolithiques (Arntz et al. 2016). Malgré cela, elle a permis d'alimenter un imaginaire déjà fourni par la mise en scène d'un nouvel âge des machines, qui grapilleraient petit à petit les compétences des salariés les moins qualifiés (Brynjolfsson et McAfee 2014). A terme, le récit envisage une « encapsulation » des compétences dans les systèmes techniques, capables de réaliser n'importe quelle tâche experte (Carbonell 2022:40).

Le pendant optimiste de cette position consiste à souligner, dans un geste proche de J. Schumpeter (1942), la disponibilité d'emplois nouveaux en nature (nouveaux types d'emplois), et en quantité (plus d'emplois qualifiés à pourvoir). Cette création d'emploi serait intrinsèque à au processus d'innovation dans son rôle de « destruction créatrice[93] ». Le recours aux systèmes d'IA pourrait en effet réduire le besoin en main-d'œuvre dans certains secteurs, mais en créer de nouveaux. Certains cabinets de conseil entrevoient par exemple la naissance de postes « d'entraîneurs », de « mainteneurs » ou « d'expliqueurs » de systèmes d'IA (Wilson, Daugherty, et Morini-Bianzino 2017).

Le thème du remplacement est aussi l'occasion d'une mise en compétition entre ceux qui auraient adopté les technologies d'IA et ceux qui ne l'auraient pas fait. On retrouve dans le discours de non-spécialistes cette idée que les salariés qui utilisent l'IA remplaceraient ceux qui n'en sont pas pourvus (Gamkrelidze 2022). D'autres interprétations plus optimistes sont issues du mouvement post-travail (*post-work*) qui voit dans les promesses de l'IA la possibilité d'une fin du travail. Le chômage technologique serait de ce point de vue une bonne nouvelle, laquelle pourrait augurer une vie de loisirs (Danaher 2017)[94].

Au sein des sphères TESCREAL, le questionnement sur le remplacement apparaît dans le sillage du récit de la singularité technologique où il est primordial. La singularité technologique suppose la transition brutale d'une situation de mainmise de l'humain sur son environnement vers la mainmise de la technique sur l'humain. Celui-ci, dans ce récit, ne pourrait s'en sortir qu'en développant lui-même d'autres techniques sophistiquées. Il est bien naturel suivant cet état d'esprit d'envisager que les travailleurs considérés (de façon arbitraire) comme moins qualifiés soient mis en danger par les systèmes d'IA. C'est cette vision que véhicule la lettre pour la pause de l'IA (Future of Life Institute 2023) ou, dans le champ francophone, des essayistes transhumanistes comme Laurent Alexandre (Lassaube 2019).

Même si, dans l'ensemble, la thèse du remplacement n'est pas très étayée ni soutenue, la diffusion massive de l'article de C. Frey et M. Osborne ([2013] 2017) a tout de même eu des conséquences importantes sur le cadrage du débat, en témoigne un nombre de citations très important (plus de 17 000 sur Google Scholar à l'heure où nous écrivons ces lignes). Pour nombre de publications, qu'elles soient médiatiques ou scientifiques (et celle-ci n'y échappe pas), la question des effets de l'IA sur l'emploi passe par celle du remplacement, même s'il s'agit d'abord de discréditer cette position.

[93] Cette position ne fait pas l'unanimité. Si J. Schumpeter associe la croissance économique à la nouveauté, cette vision a été contestée, puisqu'un changement dans les usages d'une technique peut également être à l'origine d'importantes mannes (Ménissier 2021). L'exemple de ChatGPT est frappant en ce sens que des modèles de langages similaires existaient déjà des années avant que le logiciel ne soit mis à disposition du public : c'est sa large diffusion et sa promotion qui en ont fait un succès sur le plan économique. Une autre critique émane de l'implacabilité froide du terme « destruction créatrice », qui ignore ses conséquences pratiques pour les travailleurs à risque de perdre leur emploi.

[94] Cette position ne fait cependant pas l'unanimité dans cette communauté. J. Danaher lui-même relaie cette proposition pour la critiquer. Les deux problèmes majeurs, pour J. Danaher, sont (1) celui de la distribution des gains liés aux machines, qui iraient probablement à ceux qui les possèdent plutôt qu'à la communauté des (ex-)travailleurs et (2) l'attribution individuelle du temps rendu disponible. En outre, comme le note J. Danaher, l'hypothèse d'une large substitution reste forte.

Substituer les tâches

Un point de vue plus tempéré a considéré le déploiement de l'IA comme une occasion de libérer les salariés du travail jugé inutile, pesant, répétitif, dangereux, parfois dit à *faible valeur ajoutée*. Il est par exemple concrétisé par une étude de l'OCDE qui part du principe que chaque métier consiste en un ensemble de tâches parfois diversifiées, qu'il est plus ou moins possible d'automatiser (Arntz et al. 2016). Suivant une telle méthode, le taux de « remplacement » tomberait à environ 15%. Cette perspective paraît plus réaliste, car elle envisage les emplois non pas comme des blocs monolithiques, mais comme un ensemble de tâches à réaliser. Basée sur des descriptifs textuels des métiers, elle ne fait cependant pas la différence entre le travail prescrit, celui des fiches de poste, et le travail réel, effectué en pratique.

Cette deuxième approche souligne la possibilité d'une complémentarité de la technologie par rapport à l'humain. Le système d'IA, vu comme un outil, complèterait ce que le salarié ne serait pas capable de faire par lui-même (physiquement, cognitivement), ou bien réaliserait la tâche bien plus rapidement, de sorte à lui libérer du temps. Dans l'industrie, par exemple, des activités de visionnage (*screening*) échantillonnées sur une fraction de la production, peuvent être rendues exhaustives puisqu'elles n'exigent plus l'attention d'un opérateur dont le poste serait entièrement dédié à la tâche. La pré-rédaction de documents (mails, rapports), ou de code informatique peut également être déléguée à des systèmes génératifs. Cette ambition complétatoire est notamment portée par C. Villani et ses collaborateurs dans le rapport rendu au Premier Ministre français en 2018. Les auteurs y évoquent l'intérêt de ces systèmes pour « désautomatiser les tâches humaines » (Villani et al. 2018:12). Ce qui est ciblé ici, c'est la routine, l'activité récurrente, rébarbative, facile à réaliser ; ces caractéristiques rendraient ces tâches sans intérêt. Libérer le salarié d'une tâche jugée pénible pour le faire se concentrer sur une tâche jugée plus complexe, et plus intéressante, devient ainsi un argument moral qui justifie le déploiement de nouvelles technologies toujours plus perfectionnées. Ce serait un moyen de « réhumaniser » le salarié (Ferguson 2019). Dans le même temps, il pourrait en effet développer des compétences (nouvelles ou non) sur des tâches plus stimulantes.

Une telle libération du temps reste cependant sous le contrôle des entreprises, qui y voient l'occasion d'un gain en productivité et en efficacité. Puisque la performance des entreprises reste relative à celles de leurs concurrentes, les gains de productivité sont réinvestis dans l'organisation du travail pour augmenter la quantité de tâches réalisées (Mothé 1994). Que Bill Gates se fasse le prophète d'une semaine de travail de deux jours (Fore 2025) n'y change pas grand-chose : les innovations technologiques successives ne réduisent pas le temps de travail qu'elles participent à faire gagner. Au contraire, à la façon d'un effet rebond technologique[95], elles donnent la possibilité de produire plus et plus rapidement à moindre coût. Cela pourrait expliquer pourquoi certaines entreprises cherchent à circonscrire l'usage d'innovations qui leur feraient perdre le contrôle sur la façon dont s'exerce le travail. IBM (2024), qui produit des logiciels et services pour le développement de l'IA présente ainsi l'IA

[95] Sur le modèle de l'effet rebond, ou paradoxe de Jevons, du nom de l'économiste britannique qui a montré que malgré l'optimisation de la performance énergétique des machines à vapeur, au cours du XVIIIème siècle, la consommation globale de charbon avait augmenté. En effet, il était devenu moins coûteux d'utiliser du charbon, qui pouvait dès lors être utilisé plus abondamment. De la même façon, l'introduction de technologies visant à augmenter la productivité font en principe gagner du temps, qui peut désormais être alloué à d'autres tâches. Le temps gagné ne s'accumule pas forcément.

fantôme (*shadow AI*), c'est-à-dire l'usage de l'IA de façon dissimulée par les salariés, comme un risque à part entière à gérer par les entreprises[96]. De la même façon, la firme Amazon, qui s'est lancée plus tardivement dans la course à l'IA[97], et intéressée par son déploiement dans l'ensemble de la sphère sociale, peine à supporter les candidatures rédigées en partie grâce à des agents conversationnels (Kim 2025).

Plusieurs études viennent nuancer la possibilité d'une substitution nette des tâches et les bienfaits de l'automatisation. L'une d'entre elles rappelle que les métiers ne sont pas réductibles à la somme des tâches qu'ils comportent, en mettant en avant toute la dimension sociale et coopérative du travail (Fernández-Macías et Bisello 2020). Un autre article montre en outre que la complémentarité technologique n'a pas d'effets positifs *en soi* sur le bien-être au travail (Nazareno et Schiff 2021). Les auteurs établissent par exemple un lien entre l'introduction de technologies numériques et l'augmentation du stress au travail depuis les années 2000. C'est suivant la qualité de l'environnement de travail, suggèrent-ils, que l'intégration de nouvelles technologies pourra être bénéfique du point de vue du bien-être au travail. Les présupposés positifs d'une suppression des tâches répétitives méritent en ce sens d'être questionnés. S'il ne reste plus que des tâches intenses sur le plan cognitif, il n'est pas certain que le travail en soit plus épanouissant pour autant.

Les promesses de l'*Industrie 4.0* pour le travail

Au sujet du travail, le discours de K. Schwab ([2016] 2017) est relativement modeste. Le travail est peut-être l'un des thèmes sur lequel il se montre le plus incertain, le moins déterministe. D'une certaine façon, il s'écarte du régime de la promesse. K. Schwab considère ce débat à la lumière de l'opposition entre création et destruction d'emploi, dans laquelle il refuse de se placer, « il faut résister à la tentation de pensées binaires concernant l'impact de la technologie sur l'emploi et l'avenir du travail », écrit-il (Schwab [2016] 2017:54). Au contraire, il entrevoit la possibilité pour ces technologies d'améliorer à la fois les compétences et le travail des salariés.

Plus généralement, l'une des promesses de l'*Industrie 4.0*, prolongeant les desseins de la robotique, est celle d'une meilleure coopération entre l'humain et la machine (Barcellini et al. 2023). Elle passe d'abord par l'assurance de la sécurité de ses utilisateurs : c'est suivant ce principe qu'ont été imaginés les robots collaboratifs[98] (ou cobots) au milieu des années 1990 (Moricot 2020). Petit à petit, ce champ de la robotique s'est mué en une « robotique soumise » (Claverie, Le Blanc, et Fouillat 2013) dans l'objectif de donner une prééminence à l'agentivité de l'utilisateur, de sorte à désamorcer la rivalité humain-machine (Moricot 2020). Le cobot incarne en ce sens l'idéal d'une technologie en symbiose avec son utilisateur,

[96] Au-delà des questions de productivité, des enjeux de sécurité des données sont mis en avant par IBM. L'alerte est légitime : une mésaventure de ce type, vécue à Samsung, a particulièrement été médiatisée (Petkauskas 2023)

[97] Amazon a investi plusieurs milliards de dollars dans l'entreprise Anthropic (Le Monde avec AFP 2023), qui a notamment développé les agents conversationnels Claude.

[98] Pour voir un exemple, voir la vidéo suivante sur YouTube, postée par l'entreprise de métrologie britannique The Sempre Group : *https://www.youtube.com/watch?v=35KhfiAmE4o*. On y aperçoit un bras articulé qui, sur un fond sonore du groupe ABBA, ouvre un espace confiné dans lequel il récupère et nettoie une pièce fraîchement usinée, en dépose une autre brute, ferme la porte et active le panneau de commande pour lancer un nouveau cycle d'usinage. La pièce usinée est posée sur une paillasse et récupérée par un opérateur humain qui semble vérifier la bonne exécution de ces étapes.

qui pourrait s'en servir comme d'une extension de lui-même. On retrouve, dans cette vision les échos de « l'employé augmenté » par la machine (Ferguson 2019). Ils peuvent aussi bien faire référence à la pensée transhumaniste qu'aux projets d'Augmentation de l'Intelligence (AI) par l'IA, incarnés par des auteurs comme Joseph Licklider ou Douglas Engelbart (Henriksen et Blond 2023).

Une autre promesse concerne l'accroissement de la participation des salariés à l'organisation du travail dans le but de tirer bénéfice de leurs suggestions. Le renouveau de l'industrie serait l'occasion aussi bien d'interroger la participation des salariés au déploiement de technologies innovantes que, réciproquement, de voir comment ces nouvelles technologies pourraient permettre d'améliorer la participation des salariés aux processus décisionnels (Vereycken, Ramioul, et Hermans 2021). Suivant ces principes, pourrait-on imaginer que la transformation de l'industrie permette de briser la verticalité des organisations productives et de réinjecter un élan démocratique en leur sein[99] ? Comme le constatent Y. Vereycken et ses collègues (2021), les considérations optimistes d'une meilleure participation des salariés semblent pourtant se concentrer sur la réalisation de leur propre travail, à l'échelle individuelle, en laissant peu de place à la participation à la gouvernance des équipes ou des entreprises.

Dérouler une promesse satisfaisante

Dans l'ensemble, pour se rendre acceptable, le récit de la quatrième révolution industrielle doit se rendre désirable, pas seulement aux yeux des industriels et des investisseurs, mais aussi à ceux des salariés. En Allemagne, où la culture syndicale est forte, les syndicats jouent un rôle important dans la numérisation de l'industrie, en se formant et s'informant pour mieux négocier les changements organisationnels (Haipeter 2020). La place de premier choix prise par ces organisations salariales force ainsi à orienter le récit collectif selon des canons qui les satisfont, d'où les gages donnés pour de meilleures conditions de travail. Dans un contexte organisationnel où chaque entreprise reste dépendante de ses salariés, le discours du remplacement des travailleurs ne peut subsister qu'à la marge, même s'il peut être brandi comme une menace (Jarrige 2014). Plusieurs voies peuvent alors se dessiner du côté des directions d'entreprise, comme elles se manifestent à l'occasion du panel « Soutenir le futur du travail grâce à l'intelligence artificielle » du Sommet pour l'action sur l'IA qui se tient à Paris le 10 février 2025. Guillaume Faury, à la tête d'Airbus, y explique que malgré l'importance du dialogue social, le déploiement de l'IA offre de tels avantages concurrentiels qu'il n'est pas tenable de la négocier : il faut alors embarquer, susciter l'adhésion, dans une situation de forte incertitude. D'autres comme Denis Machuel, PDG d'Adecco, adoptent des positions équivoques sur le statut de l'IA en maintenant, d'un côté, l'alerte sur le risque d'obsolescence des salariés, mais en prescrivant, de l'autre, la formation en IA comme une solution à ce problème.

Comme cela a été pointé dans le cas de l'IA en radiologie (Arena, Gaglio, et Vayre 2024), les promesses d'une assistance par l'IA des travailleurs, « s'imbrique » ainsi à la promesse initiale du remplacement, à laquelle elle répond directement. On peut ainsi faire l'hypothèse que l'essoufflement des augures du remplacement ne découle pas seulement de la mise à l'épreuve progressive des systèmes d'IA (qui ne

[99] F. Butollo et ses collègues (2019) font remarquer qu'il existe pour l'*Industrie 4.0*, à l'instar du lean management hérité de Toyota, une possible déconnexion entre des principes théoriques pour une coopération plus égalitaire, et la manière dont le management des organisations s'oriente en pratique. Ces auteurs font reposer les bénéfices de l'*Industrie 4.0* non pas sur les technologies qu'elle embarque, mais plutôt sur les négociations qui l'entourent.

se révèlent pas si disruptifs en pratique), mais aussi de la difficulté à faire avaler cette thèse aux acteurs concernés. Elle engagerait une forte résistance à l'encontre d'un projet de substitution frontal, trop radical et trop menaçant.

Conclusion (I.2)

La revue des promesses de l'IA dans l'*Industrie 4.0* fait ressortir trois thèmes majoritaires. Le premier est celui de la perfection technique de systèmes à l'efficacité surhumaine. La comparaison avec l'utilisateur humain est permanente pour mettre en valeur ces dispositifs, qu'il s'agisse de leur prêter des attributs humains, ou au contraire de les présenter comme n'ayant rien à voir avec la bassesse de la matérialité anthropique. Un second thème est celui de la perfection économique, au sens où l'IA industrielle permettrait de relever de nombreux curseurs nécessaires à l'épanouissement économique des organisations qui s'en doteraient : meilleure réactivité, meilleure flexibilité, meilleur contrôle, meilleure personnalisation des procédés productifs. Ces deux promesses concourantes amènent à envisager l'intérêt des systèmes d'IA pour le travail selon deux angles divergents : le remplacement d'employés devenus obsolètes, ou bien l'assistance des salariés enchâssés dans l'appareil productif. Ce passage en revue nous permet, en agrégeant les résultats décelés dans la partie (1), d'édifier un tableau des promesses, voir (Tableau 5).

Promesse…	**… qui porte sur…**	**Motif discursif employé**	**Enoncé du motif discursif**
… du renouveau industriel…	La temporalité du changement	Inéluctabilité	La transformation générale de l'industrie va se produire, elle a d'ailleurs commencé.
		Disruptivité	Les changements à venir sont profonds et radicaux.
		Grande époque	Il est nécessaire d'agir dès maintenant car l'époque actuelle est celle où tout se joue.
… de l'intelligence artificielle (dans l'industrie)…	L'intérêt technique de l'IA	Anthropomorphisation	Les systèmes d'IA sont comparables aux humains dans leur capacité à établir des raisonnements et produire de la connaissance.
		Déshumanisation	Les systèmes d'IA outrepassent les limites fonctionnelles des humains en termes de capacité de résolution de problème et d'objectivité du jugement.
	L'intérêt économique de l'IA	Réduction de l'incertitude	Les systèmes d'IA permettent d'anticiper les problèmes à l'avance et de gérer des demandes inattendues.
		Continuité du modèle économique capitaliste	La numérisation permet de prolonger un modèle économique basé sur la division du travail et l'accumulation des ressources.
	L'intérêt pour le travail de l'IA	Obsolescence du travail humain	Les systèmes d'IA réalisent mieux le travail intellectuel que les humains eux-mêmes.
		Epanouissement par l'assistance technique	Les systèmes d'IA soulagent les salariés en s'occupant des tâches fastidieuses.

Tableau 5 : Promesses relatives à l'IA dans l'industrie.

Ainsi énoncées, ces promesses peuvent paraître décontextualisées, comme flottantes dans les airs. La section suivante s'attachera à les faire incarner au travers de l'analyse du rôle de l'industrie du semiconducteur dans la production de ces promesses.

3. L'industrie du semiconducteur comme acteur de la diffusion des promesses technologiques

Cette thèse est indissociable du secteur économique dans lequel nos observations empiriques se sont ancrées : l'industrie du semiconducteur. Nous aurons l'occasion de détailler à partir du prochain chapitre les conditions matérielles et organisationnelles dans lesquelles s'y opère la fabrication des puces électroniques à partir des plaques de silicium. A ce stade, nous proposons d'affiner notre compréhension du positionnement de l'industrie de la micro-électronique dans la sphère de la promesse de l'IA. Nous aurons d'abord l'occasion de mettre en lumière le caractère stratégique d'une production cruciale aussi bien du point de vue économique que géopolitique (0). Dans un second temps, nous verrons comment l'industrie de la micro-électronique contribue elle-même à produire et diffuser les promesses de l'IA décrites en amont de ce chapitre (3.b). Nous conclurons en pointant le rôle déterminant des acteurs du semiconducteur dans la construction d'une promesse technologique européenne de l'IA, au travers de la description d'un projet de recherche industriel européen (3.c).

3.a. L'industrie de la micro-électronique comme secteur stratégique

Infineon, STMicroelectronics, NXP Semiconductors : ces noms sont familiers à ceux qui s'intéressent de près aux enjeux liés aux semiconducteurs. Ils correspondent aux principales entreprises qui produisent des semiconducteurs sur le territoire européen aujourd'hui.

Faute d'un recensement précis, il est difficile d'évaluer avec exactitude l'implantation de cette industrie sur le sol métropolitain français[100]. Malgré tout, il est possible de se référer à une carte produite à la fin des années 2000, à l'occasion d'une mission confiée par le Ministère de l'Industrie au directeur du CEA[101] (Malier 2009), voir (Figure 11).

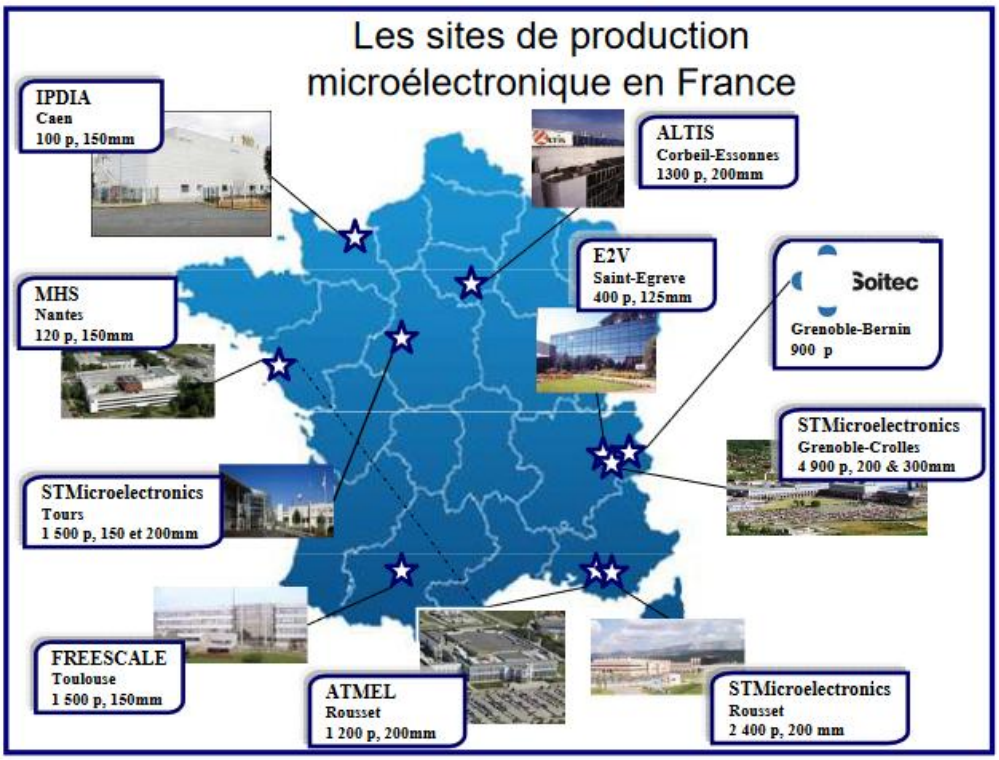


Figure 11 : Carte des sites industriels français de production de semiconducteur à la fin des années 2000 (Malier, 2009). La légende originale précise « seuls les emplois directs sont mentionnés, sans intégrer les sous-traitants employés sur site ».

Un secteur en évolution constante

Dans les années 2010, la répartition de l'industrie de la micro-électronique est relativement éparse et homogène sur le territoire français. Une zone en particulier, la vallée du Grésivaudan, proche de

[100] La stratégie Electronique 2030 présente malgré tout quelques cartes intéressantes à ce sujet (Gouvernement français 2022). La première (p. 8) présente les investissements réalisés par la France en 2020 et 2021 dans le cadre de l'appel à projets France Relance. La seconde (p. 15) recense les projets financés dès 2022, à hauteur de dix milliards d'euros. La troisième enfin (p. 19), indique les différents centres de recherche académiques dédiés à l'électronique.

[101] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, anciennement Commissariat à l'énergie atomique (le nom a changé en 2010). Il s'agit d'un organisme de recherche à caractère scientifique, technique et industriel qui est le lieu de nombreux partenariats entre public et privé. Originellement, il était voué à concentrer la recherche française dans le nucléaire, qu'il s'agisse d'énergie ou de défense. Ses activités se sont diversifiées depuis. C'est un acteur important dans l'écosystème français de l'industrie de la micro-électronique.

Grenoble, concentre plusieurs sites de production proches les uns des autres. C'est une configuration courante. Le regroupement géographique des acteurs de la micro-électronique, que l'on observe typiquement dans la Silicon Valley, s'inscrit dans une stratégie globale d'intégration des activités de recherche et développement à la production (Lécuyer et Choi 2012). La localisation dans des mêmes régions permet de bénéficier d'un vivier large de personnel compétent, connaisseur de ces technologies particulières (Lécuyer et Choi 2012).

Cette carte, datée, ne doit pas être prise pour argent comptant car certaines des informations qui y figurent ne sont plus tout à fait vraies. L'analyse de son obsolescence est un exercice intéressant en soi.

Le site de production de Freescale (ex-Motorola), à Toulouse, a fermé en 2012. La fermeture est notamment imputée à un certain retard technologique, et seules les activités de R&D y ont été conservées (Marcaillou 2012). Elle a depuis été rachetée par le géant étasunien NXP Semiconductors. MHS, à Nantes, a été placée sous liquidation judiciaire en 2011. La moitié de ses salariés, constituant les équipes travaillant sur les protocoles de tests des composants micro-électroniques, ont été repris par un concurrent, Atmel, mais les activités de production ont été abandonnées, et l'autre moitié des salariés, licenciés (Ouest-France 2011). Atmel elle-même, présente à Rousset, est acquise en 2015 par l'étasunienne Microchip (issue de General Instrument). Microchip conserve les activités de R&D qui y étaient établies. En Normandie, iPDiA (qui est elle-même issue de NXP Semiconductors) est devenue Murata Integrated Passive Solutions suite à son rachat par le groupe japonais Murata en 2016 (Loukil 2017a). La même année, Altis, placée sous liquidation judiciaire, est revendue à la société belge X-FAB (Loukil 2017b) tandis qu'e2v, à Saint-Egrève, est rachetée par l'étasunien Teledyne (Pentier 2017). En fait, Soitec et STMicroelectronics sont les seules entreprises présentes sur cette carte dont les informations sont toujours vérifiées[102].

Que retenir de cette énumération ? Nous suggérons qu'elle illustre trois points clés concernant l'industrie de la micro-électronique : la diversité de ses acteurs, le caractère incertain de son marché, et sa polarisation géopolitique.

Une industrie diversifiée sur le plan des acteurs

Il existe, d'abord, une grande diversité d'acteurs, qui est liée à la grande diversité de matériaux et de produits constituant les flux de cette industrie. Certains dispositifs à semiconducteurs sont adaptés à certaines applications grand public, et moins à d'autres. Dans un souci d'optimisation technique, ces applications particulières demandent des micro-processeurs[103] particuliers, qui justifient une collaboration institutionnelle rapprochée entre secteurs public et privé. En France, le positionnement du CEA est emblématique de ces partenariats. A Grenoble par exemple, le CEA-leti[104] fait partie du réseau des instituts Carnot, qui promeut la coopération entre recherche publique et entreprises. L'histoire de ce laboratoire, qui concentre des investissements publics et privés, a une certaine contiguïté avec celle de l'industrie de la micro-électronique locale (Daviet 2000). Des activités de recherche communes continuent

[102] Nombre de salariés mis à part.

[103] Le micro-processeur est une unité de traitement de l'information qui tient sur une puce électronique.

[104] Ou LETI, pour Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information. Il n'apparaît pas sur la carte.

d'y être menées, de sorte que le LETI soutient STMicroelectronics, et réciproquement. On ne saurait ainsi résumer les acteurs de la micro-électronique aux seules firmes qui diffusent ces technologies.

Si l'on ne retient que les acteurs privés du secteur, on constate qu'il existe une variété d'entreprises qui s'exprime au travers des fonctions qu'elles remplissent, voir (Figure 12). On peut les différencier en trois catégories : (1) les fonderies[105] – qui ne font que produire –, (2) les *fabless*[106] – qui se concentrent seulement sur la conception – et (3) *les Integrated Device Manufacturer*[107] *(*IDM) – qui font les deux. Cette division du travail a été initiée dans les années 1980 (Miller 2022). Elle a notamment permis de reporter l'incertitude technique sur les fournisseurs (de machines de production, de composés chimiques) dans l'évolution des procédés de fabrication (Lécuyer et Choi 2012). Elle repose notamment sur une diminution des coûts unitaires, avantageux pour les fonderies qui peuvent produire des composants similaires pour différents clients *fabless* (Ericher et al. 2025). Ces derniers, dont l'activité est découplée des contraintes productives, peuvent en outre se concentrer pleinement sur leurs travaux de conception.

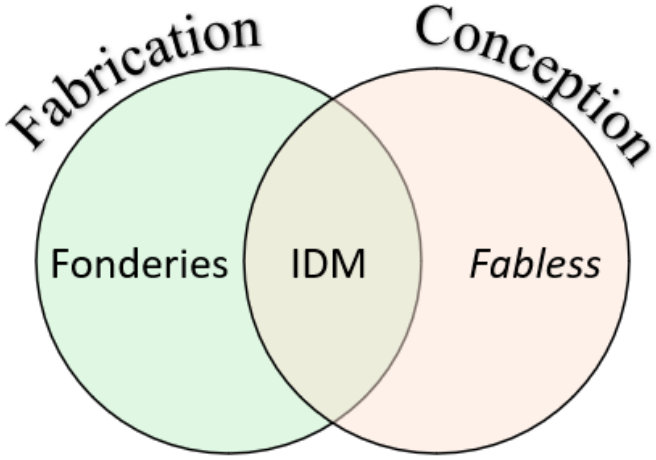


Figure 12 : Dénomination des acteurs de la micro-électronique.

Une industrie qui fait face à d'importantes incertitudes

L'abondance de rachats d'entreprises pointe vers un secteur économiquement dynamique, mais aussi instable. C'est l'un des constats que fait M. Aubry (2012) dans sa thèse. Le marché des semiconducteurs est caractérisé par une forte incertitude qui provient notamment de la rapidité avec laquelle les innovations se remplacent les unes les autres. En France, certaines entreprises ont été capables de s'adapter à ces changements répétés, voire cycliques, d'autres pas ; le contexte de la crise des subprimes de 2008 n'offrant pas, en outre, un contexte économique accommodant. Dès les années 1990, l'une des stratégies adoptées par les entreprises françaises pour faire face à cette incertitude est justement l'arrêt de la production en interne, et le recours à la sous-traitance, devenant ainsi des acteurs *fabless*. C'est par exemple le choix réalisé en 2001 par le PDG d'Alcatel, Serge Tchuruk, alors que l'entreprise fait face à

[105] On compte parmi elles : Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (Taiwan, on lit TSMC) ou GlobalFoundries (Etats-Unis).

[106] Littéralement « sans fab » : sans unité de fabrication. Ce sont les acteurs les plus connus du marché : Nvidia, Qualcomm, Apple (toutes basées aux Etats-Unis).

[107] IDM pour *Integrated Device Manufacturer.* En guise d'exemples : Samsung (Corée), Intel (Etats-Unis), STMicroelectronics (France / Italie), NXP Semiconductors (Pays-Bas, il s'agit d'une division de la branche semiconducteur de Philips), Infineon (Allemagne, provient de Siemens).

d'importantes difficultés : « Nous souhaitons être très bientôt une entreprise sans usines », annonce-t-il (Brafman 2006). Ces décisions ne sont pas sans conséquences puisque de nombreuses usines sont fermées sur le sol français. L'heure est alors à la désindustrialisation vers des pays comme la Chine, où la main-d'œuvre est moins onéreuse. D'un autre côté, les fonderies peuvent pleinement se concentrer sur leur capacité de production et la faire évoluer selon les besoins de leurs clients, forgeant ainsi une collaboration dans laquelle les acteurs sont interdépendants économiquement, dans une alliance entre ceux qui produisent et ceux qui conçoivent.

Une industrie au cœur de tensions globales…

Un dernier élément important concerne la nationalité des entreprises impliquées dans ces transactions. La compétition est autant celles des entreprises que celles des états, voir (Figure 13). En l'occurrence, les rachats, pour la plupart, sont effectués par des entreprises étasuniennes. Les Etats-Unis dominent historiquement le marché des semiconducteurs, avec plusieurs pays d'Asie de l'Est (Japon, Corée du Sud, Taiwan). Tout au long de la Guerre froide, les Etats-Unis se sont servis du tissu économique de ces pays, dont la main-d'œuvre était bon marché, pour assoir leur hégémonie dans le secteur (Miller 2022). En retour, ces états ont profité des investissements pour devenir des concurrents sérieux (Miller 2022). Les entreprises européennes (Infineon, NXP, STMicroelectronics) sont compétitives, mais dans une moindre mesure[108]. L'Europe, au travers de l'entreprise néerlandaise ASML[109], se distingue surtout dans

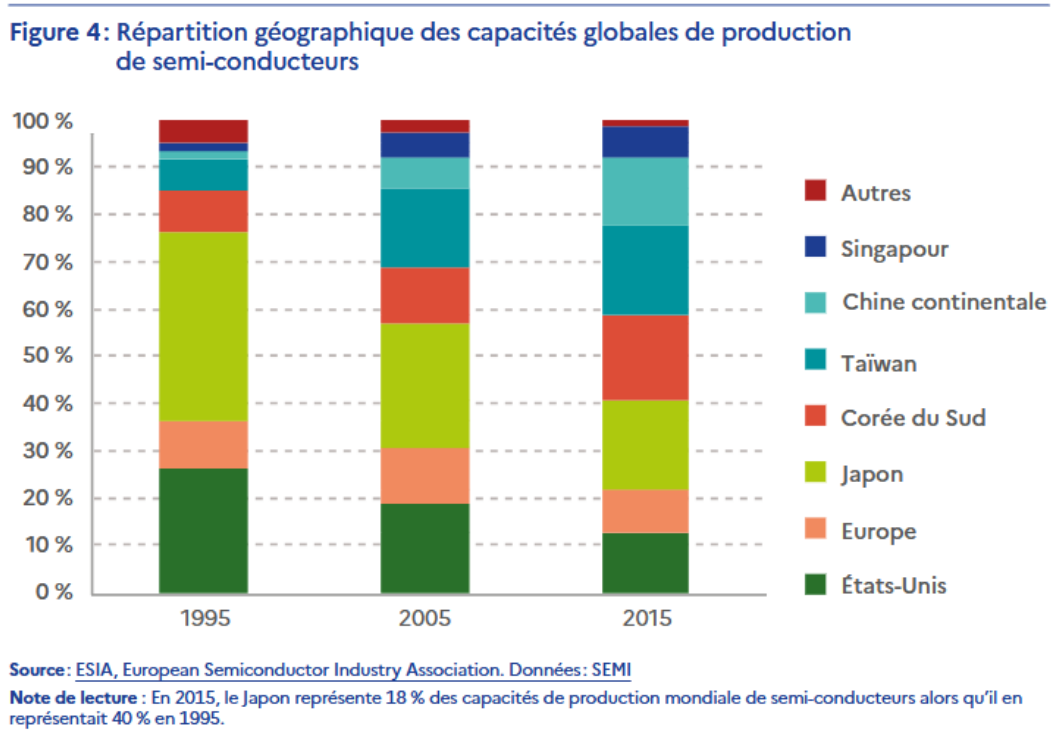


Figure 13 : Répartition géographique des capacités de production (et seulement production) de semiconducteurs entre 1995 et 2015 (Ericher et al., 2025).

[108] Voir par exemple les classements annuels effectués par le cabinet de conseil Gartner par rapport aux chiffres d'affaires réalisés par les acteurs du semiconducteur (Gartner 2024). Les entreprises européennes figurent en général autour de la dixième place.

[109] En 2025, ASML a par ailleurs recruté l'ancien ministre français de l'Economie, Bruno Le Maire (Lefilliâtre 2024), qui avait participé aux négociations concernant les investissements publics français en Isère (Gueant 2022). La

le domaine de l'assemblage des machines de photolithographie, indispensables dans les procédés de fabrication et dont les prix avoisinent les dizaines voire les centaines de millions d'euros.

La domination économique étasunienne est récemment mise en péril par la volonté de la Chine de rattraper son retard dans le domaine du semiconducteur. Engagées dans une « guerre des semiconducteurs », les deux puissances cherchent à asseoir leur mainmise sur des technologies cruciales sur le plan militaire (Miller 2022). L'île de Taiwan est une victime collatérale de cet étau géopolitique. Elle abrite le siège et les sites de production de la plus grosse fonderie du monde, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), ce qui en fait un territoire clé du point de vue économique (Shattuck 2021). En principe politiquement indépendante de la Chine (mais revendiquée par celle-ci) et commerçant abondamment avec les Etats-Unis, elle est le lieu d'enjeux géopolitiques considérables.

Dans le même temps, en Europe, l'heure est à la réindustrialisation. En 2022, le président Macron annonce un investissement de plus de deux milliards d'euros de l'Etat français pour soutenir l'extension de l'usine de Crolles, en Isère, dans un partenariat entre STMicroelectronics et GlobalFoundries (Macron 2022). La pandémie de Covid a, en 2020, freiné la production de semiconducteurs d'une part, et réorienté celle-ci vers des usages liés à des appareils électroniques comme les ordinateurs ou les smartphones d'autre part, avec pour conséquence une pénurie dans le secteur automobile, désormais très dépendant de systèmes électroniques (Frieske et Stieler 2022). C'est notamment dans ce segment que STMicroelectronics a pu s'illustrer, ce qui l'a fait figurer au huitième rang mondial (la première européenne) des vendeurs de semiconducteurs en 2023 (Gartner 2024). En dépit de ces bons résultats et de ces investissements publics conséquents, l'entreprise prévoit en 2025 de se séparer de nombreux salariés (Deumier 2025), signe d'une difficulté à capitaliser sur des succès commerciaux dans un secteur économique instable.

… et de contestations locales

Un des enjeux forts de la relocalisation de l'industrie sur le territoire européen, est, pour le gouvernement français, de garantir une « souveraineté industrielle » en reprenant le contrôle de l'ensemble de la chaîne de production du semiconducteur (Macron 2022). Le chantier d'une pleine « souveraineté industrielle » est périlleux dans un secteur qui reste largement mondialisé, avec de nombreuses interdépendances entre entreprises mais aussi entre pays (Ji, Nauta, et Powell 2023). Un *wafer* voyage autour du monde tout au long de sa fabrication (Ahmed et al. 2025), et les étapes réalisées en France ne constituent qu'une part minime de son parcours industriel. A. Valdivia (2024) documente par exemple la chaîne de production des micro-processeurs de Nvidia : l'or est miné en Colombie, le tungstène au Brésil, l'étain en Chine, le tantale au Kazakhstan et le tout est réuni dans les fonderies de TSMC, à Taïwan, pour gravure sur les plaques de silicium, voir (Figure 14).

Dans un contexte où les entreprises européennes fabriquent peu mais sont reconnues pour la qualité de leurs activités de conception, certains auteurs rappellent qu'elles sont déjà, de ce point de vue, un maillon incontournable de la chaîne d'approvisionnement (Hancké et Garcia Calvo 2022). Malgré tout, l'intégralité

Haute Autorité pour la transparence de la vie publique (HATVP) a validé cette reconversion, sous certaines réserves.

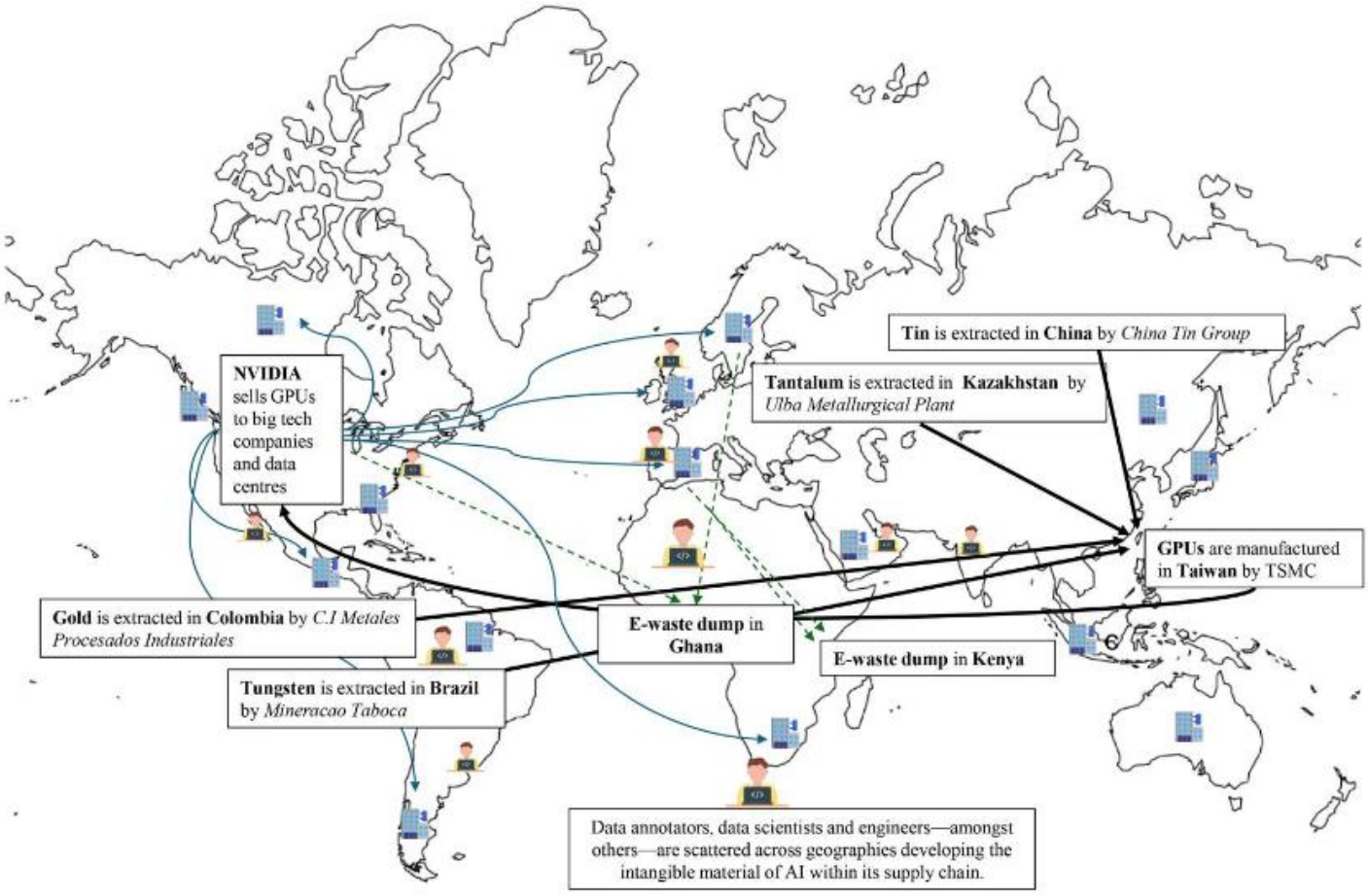


Figure 14 : Chaîne d'approvisionnement partielle des micro-processeurs de Nvidia, issu de (Valdivia, 2024).

de la chaîne de valeur ne pourra pas être abritée en France, le pays ne disposant pas des ressources nécessaires en terres rares, essentielles à la fabrication des composants électroniques. Ces « métaux de transition » (Izoard 2024), déterrés dans des mines industrielles ou artisanales, polluantes et peu regardantes sur les droits humains, ont pu être qualifiés de « minerais de sang » (Boltanski 2011). L'exploitation de ces ressources s'inscrit dans un contexte de conflits, comme en République Démocratique du Congo, où l'extraction est souvent opérée sous le joug de milices armées, sous l'œil complice des puissances occidentales (Lebrun 2024).

Dans ce contexte, des mouvements collectifs de protestation se constituent. En Isère par exemple, le groupe STopMicro mène depuis 2022 une lutte informationnelle active qui cible les entreprises locales de la micro-électronique, voir (Figure 15). Elle se traduit par la réalisation d'enquêtes, l'organisation d'événements de sensibilisation ainsi que des manifestations (Demenus 2024). Ce sont en particulier les projets d'extension des entreprises de la vallée du Grésivaudan qui sont visés. Autour du slogan « De l'eau, pas des puces » qui dénonce la consommation d'eau de l'industrie et ses rejets d'eau polluée, d'autres types d'arguments s'agrègent. Dans les années 1980, les travaux menés sur les mouvements sociaux ont déjà montré comment ceux-ci sont amenés à redéfinir leur cadre argumentatif, en faisant par exemple le lien entre des causes qui paraissent pourtant déconnectées *a priori* (Snow et al. 1986). En l'occurrence, les critiques (non-exhaustives) adressées à l'industrie de la micro-électronique dans la

région concernent ses liens avec le secteur de l'armement, le caractère extractiviste de l'industrie minière dont elle dépend ou encore l'artificialisation de terres agricoles fertiles[110].



Figure 15 : Affiche d'une série d'événements organisés en mars 2025 par le collectif STopMicro.

Un segment stratégique

Si, malgré ces contestations, l'industrie du semiconducteur suscite tant d'investissements, c'est qu'elle recoupe des intérêts économiques très importants. L'investissement isérois évoqué ci-dessus fait par exemple partie de la Stratégie Electronique 2030 dévoilé lors de la visite du site par le président Macron (Gouvernement français 2022). Cette stratégie fait elle-même écho au *Chips Act*, qui dévoile la stratégie européenne dans ce cadre (Parlement Européen 2023), et qui vise à augmenter la part européenne dans la production mondiale du semiconducteur (Ericher et al. 2025).

De quelle stratégie parle-t-on ? Même dans son acception économique, le terme reste polysémique. Dans une analyse de l'industrie de l'électronique, B. Paulré (1997b) suggère cinq façons d'interpréter le caractère stratégique d'un secteur économique. Un secteur serait ainsi qualifié de stratégique :

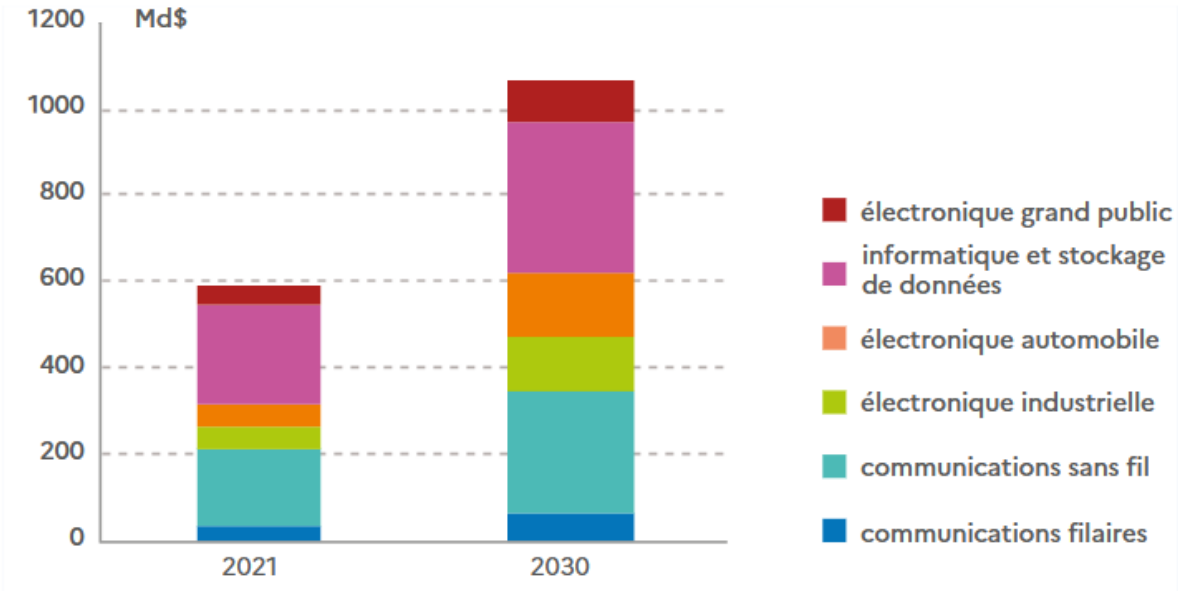
1. Parce qu'il détient un potentiel économique important par lui-même ; il permet de créer de la richesse,
2. Parce qu'il détient un potentiel économique en tant que « vecteur d'innovation pour le reste de l'économie » (Paulré 1997b:11) ; c'est-à-dire que d'autres secteurs eux-mêmes stratégiques peuvent se saisir des innovations dans le domaine,
3. Parce qu'il est déterminant en ce qui concerne l'augmentation de la productivité, notamment *via* l'automatisation,
4. Parce qu'il est déterminant en ce qui concerne la course technologique engagée avec d'autres pays,
5. Parce qu'il est déterminant en ce qui concerne des enjeux d'indépendance nationale et de souveraineté militaire[111].

[110] Une bande dessinée intitulée *Toujours puce* vulgarise avec humour et clarté les controverses liées à l'industrie de la micro-électronique (Lecarpentier et Lecarpentier 2024).

[111] Les accointances entre les industries de la micro-électronique et de l'armement suscitent des controverses. La présence de composants de fabrication française dans des armes russes ayant frappé l'Ukraine en 2023 a notamment fait polémique (Vigny 2023).

A tout point de vue et quelle que soit l'acception choisie, argumente B. Paulré, l'industrie de l'électronique se révèle être un secteur stratégique. Cela tient notamment à la nature « diffusante » et « générique » des technologies du semiconducteur (Paulré 1997b). Elles sont diffusantes en tant qu'elles sont la brique unitaire d'un nombre conséquent d'autres technologies, elles aussi stratégiques (systèmes de télécommunications par exemple) et largement présentes dans l'économie. Elles sont en outre génériques au sens où elles ouvrent de nombreuses opportunités d'innovation dans les nombreux domaines qui y ont recours[112]. Cette pervasivité s'illustre aisément, puisqu'aujourd'hui, les secteurs de l'automobile, de l'armement, de la bureautique, de l'électroménager, des télécommunications, des industries de tout type, ont tous besoin de dispositifs à semiconducteurs, voir (Figure 16). Reconnaissant l'omniprésence, la crucialité et la criticité des technologies du semiconducteur, la stratégie française s'étend selon trois axes : soutien des activités de production, soutien à l'innovation et la recherche et soutien à la formation en électronique (Gouvernement français 2022).

L'enjeu est de taille pour les entreprises de la micro-électronique, engagées dans des partenariats étroits avec les états. Leur compétitivité est supposée assurer leur pérennité, et leur hégémonie. Or, l'un des moyens d'assurer cette compétitivité, et c'est là qu'intervient le récit du renouveau industriel, serait d'opérer une transformation numérique qui puisse soutenir une demande ascendante, en termes de qualité, comme de quantité. En tenant ce récit pour vrai, les acteurs du semiconducteur ont tout intérêt à se joindre au projet de numérisation de leurs procédés.



Source : McKinsey on Semiconductor : Creating Value, pursuing innovation and optimizing operations, novembre 2021.
Données : Gartner

Figure 16 : Marché des semiconducteurs par domaine d'application, chiffres mesurés en 2021, prédits en 2030 (en milliards d'euros) par Gartner (Ericher et al., 2025). Rappelons (introduction du chapitre I), que les cabinets de conseil tel que McKinsey ou Gartner sont des parties prenantes à part entière dans la mise en valeur des nouvelles technologies numériques.

[112] Cette dimension stratégique rappelle la critique de J. Ellul sur l'auto-accroissement de la technique : « La technique s'engendre elle-même. Lorsqu'une forme technique nouvelle parait, elle en permet et en conditionne plusieurs autres. » (1990:98).

Industrie de la micro-électronique et vague 4.0

Dans le récit des quatre révolutions industrielles fait par K. Schwab ([2016] 2017), la micro-électronique tient une place discrète mais centrale. Du point de vue de K. Schwab, ce sont les progrès dans le domaine des semiconducteurs qui ont précipité l'avènement d'une troisième révolution industrielle dans les années 1960, en ce qu'ils ont permis, sur le plan technique, le développement des ordinateurs et plus généralement de l'infrastructure numérique, bien implantée aujourd'hui.

L'industrie de la micro-électronique, et nous aurons l'occasion d'y revenir dans la prochaine sous-section, est à la fois juge et partie du récit de la nouvelle révolution industrielle. Elle est engagée dans ce que l'on pourrait appeler un ouroboros[113] industriel, au sens où elle contribue à produire les technologies qui doivent assurer sa propre continuité technique. Les outils numériques de la révolution industrielle ont recours, pour la plupart, à des micro-processeurs, eux-mêmes constitués de dispositifs à semiconducteurs. Autrement dit, pour s'équiper, l'industrie du semiconducteur est (à quelques intermédiaires près) sa propre cliente. Elle a d'autant plus d'intérêt, dans ce contexte, à promouvoir une numérisation dont elle bénéficierait doublement.

[113] L'ouroboros est un symbole ancien, aperçu dans plusieurs cultures antiques, et notamment chez les Romains, les Egyptiens et, plus tôt encore, en Mésopotamie (Deonna 1952). Sa représentation picturale canonique est celle d'un serpent avalant le bout de la queue : il évoque le paradoxe, l'auto-engendrement, l'éternité.

3.b. Le rôle de l'industrie de la micro-électronique dans le façonnement des promesses de l'IA

Nous chercherons dans cette sous-section à éclairer la façon dont l'industrie de la micro-électronique bénéficie mais participe également activement à la diffusion des promesses de l'IA. L'engouement technique (la *hype*) naît d'une coordination, même informelle, entre acteurs qui partagent un intérêt à l'alimenter. En l'occurrence, pour ce qui est de l'IA, les acteurs du semiconducteur se positionnent sur l'essentiel des postes de transmission de la promesse de l'IA (émission comme réception) que décrit F. Lussier-Lejeune (2022).

Quand l'industrie du semiconducteur promeut l'IA

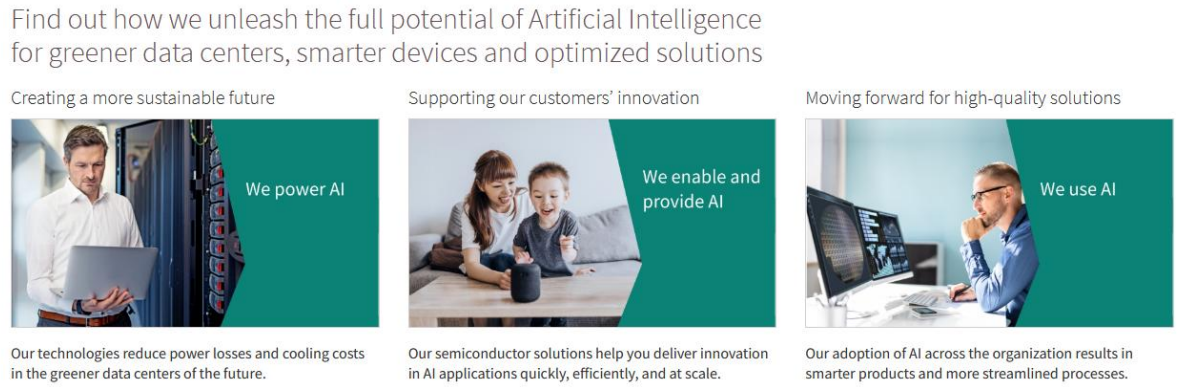


Figure 17 : Contenu promotionnel de l'entreprise Infineon.

« Nous propulsons l'IA. Nous permettons et fournissons l'IA. Nous utilisons l'IA[114]. » Voilà comment l'entreprise Infineon décrit sa relation à l'IA, voir (Figure 17). Celle-ci est sans équivoque : la firme est présente sur tous les maillons de la chaîne de production de l'IA. Elle affirme d'abord proposer des infrastructures « vertes » pour l'IA en construisant des data centers toujours plus optimisés énergétiquement[115]. Elle s'attache ensuite à fournir des micro-processeurs, des capteurs, mais aussi des environnements de développement informatique dédiés à des applications particulières de l'IA dans le domaine de la voiture autonome, de l'Internet des objets (typiquement, des assistants personnels dits intelligents, contrôlables par la voix) et de l'IA industrielle (pour le contrôle de la production ou des activités de maintenance prédictive). Elle utilise enfin l'IA dans ses propres processus productifs, dans le but affiché de les rendre plus robustes, sécurisés, et moins gourmands en énergie. Les exemples donnés

[114] « We power AI. We enable and provide AI. We use AI » (notre traduction). Voir le matériel promotionnel sur la page : https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/artificial-intelligence/.

[115] On pourra s'étonner de la persistance du qualificatif « vert » / « *green* » dans de telles campagnes promotionnelles. Les accusations d'écoblanchiment (*greenwashing*) n'ont vraisemblablement pas suffi à mettre au ban l'imaginaire d'une technologie sophistiquée mais éco-responsable. Pourtant, cette vision réduisant l'impact environnemental des technologies à leur seule consommation d'énergie et / ou à leurs émissions de gaz à effet de serre à l'usage est réductrice et occulte toute une batterie de problèmes sociaux et environnementaux qui dérivent de leur fabrication et de leurs logiques d'exploitation (Aggeri 2020; Bihouix 2021). En outre, elle oublie les mécanismes pernicieux liés à l'effet rebond – un système qui consomme moins se diffuse en plus grand nombre.

concernent le contrôle qualité ou la simulation et la modélisation pour la R&D. Les communicants d'Infineon érigent l'utilisation de dispositifs d'IA en gage de qualité et d'efficacité de leur entreprise.

Aubaine ou dessein ? Entre offre et demande en semiconducteur dans le déploiement de l'IA

Cette vigueur dans la promotion de l'IA est commune à toute l'industrie de la micro-électronique. Nous en avons donné un autre exemple frappant avec le cas de Nvidia en introduction de ce chapitre[116]. Les raisons sont avant tout économiques et stratégiques. En 2018, un rapport du cabinet de conseil McKinsey encourage déjà les acteurs du secteur du semiconducteur à s'engager pleinement dans le secteur de l'IA (Batra et al. 2018). L'argument principal des auteurs concerne l'anticipation d'une transition de l'intérêt économique du *software (*logiciels) vers le *hardware (*matériel). Techniquement, les systèmes d'IA ont besoin de plus de mémoire de stockage et plus de puissance de calcul que des logiciels classiques, toutes choses égales par ailleurs. Pour pouvoir les faire fonctionner pleinement, expliquent les auteurs du rapport, les fabricants de tels dispositifs auront donc besoin d'innovations dans le domaine des dispositifs à semiconducteurs, que produit justement l'industrie de la micro-électronique. L'hypothèse serait alors la suivante : l'industrie du semiconducteur, pour assurer le déploiement de l'IA, devrait s'astreindre à fournir des composants électroniques adaptés. Le regain d'intérêt mondial pour l'IA serait simplement une aubaine pour ces acteurs, une opportunité à saisir.

La question peut cependant se prendre par l'autre bout. Dans un billet de blog, le chercheur G. Roussilhe (2025) montre que pour maintenir sa croissance et assurer sa survie, l'industrie du semiconducteur doit vendre un nombre toujours plus grand de puces de plus en plus complexes. Pour garantir la perpétuation de ce processus, la demande doit suivre. Et si cette demande n'existe pas naturellement, il faut alors la construire. A ce titre, l'essor de l'IA générative constitue un levier de gain économique particulièrement attrayant pour ces acteurs. Son déploiement généralisé permet d'entrevoir une explosion de la demande en composants électroniques, et donc de constituer un canal d'écoulement de la production particulièrement volumineux. De plus, comme l'explique G. Roussilhe, les firmes du semiconducteur sont étroitement coordonnées avec les éditeurs de logiciel et géants du numérique. Leurs intérêts convergent largement, Plutôt que d'être d'heureux et chanceux bénéficiaires de l'engouement collectif pour l'IA, les acteurs du semiconducteur seraient ainsi motivés à le construire activement. Une autre hypothèse émerge alors : la construction d'un marché de l'IA serait un moyen pour l'industrie du semiconducteur d'assurer sa survie en réduisant l'incertitude. Ce nouveau marché garantirait l'existence d'une large demande pour les années à venir.

Le but de la thèse ne sera pas de trancher le débat sur le rôle précis de l'industrie du semiconducteur dans la construction de l'engouement pour l'IA. Il est probable que la réponse tienne dans un mélange

[116] Les exemples sont faciles à dénicher dans les contenus de communication (octobre 2024) : le site de Qualcomm accueille ses visiteurs avec le slogan « Partout, nous apportons l'informatique intelligente. » (« We bring intelligent computing everywhere. », *https://www.qualcomm.com/*) tandis que l'IA apparaît à plusieurs reprises sur la page d'accueil ; idem avec Intel « Intégrez l'IA partout avec Intel ». (*https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/homepage.html*). Il faut noter que d'autres entreprises non *fabless*, à l'instar de NXP Semiconductors, STMicroelectronics ou TSMC sont moins expansives (l'IA n'est pas le thème central de leur communication numérique) mais toutes évoquent l'IA de façon plus ou moins ostensible sur leur site Internet.

de ces deux hypothèses. Nous nous contenterons d'affirmer que l'industrie de la micro-électronique participe activement à la *hype* pour l'IA. En s'engageant dans la voie de l'IA, ces acteurs n'envisageaient probablement pas un « été » de l'IA aussi chaud (Cardon et al. 2018), à la suite de la mise en ligne de ChatGPT. Ce regain d'intérêt a d'autant plus contribué à justifier *a posteriori* l'intérêt de leur posture stratégique.

Le succès de Nvidia comme instant de convergence des promesses

Revenons à Nvidia, car la trajectoire de cette entreprise, évaluée jusqu'à des montants record (de Vynck 2023), mérite d'être précisée. Fondée en 1993, *fabless*, elle se concentre sur la conception de dispositifs à semiconducteurs. Initialement, elle se positionne sur le marché des cartes graphiques, essentiellement pour des applications liées au monde du jeu vidéo[117]. Elle se fait petit à petit connaître auprès du grand public en équipant des ordinateurs et des consoles de salon et est déjà, au tournant des années 2010, relativement bien placée parmi les acteurs de la conception *fabless*. Parmi ses technologies phares figure le Cuda[118], sorti en 2006, qui permet de paralléliser les calculs, c'est-à-dire de faire plus de calculs en même temps[119] (Se 2024). La mise à disposition de ces nouvelles cartes graphiques, d'abord destinées à générer des univers virtuels pour les jeux vidéo, amène les chercheurs en traitement d'images à expérimenter avec celles-ci (Se 2024), jusqu'à ce qu'un point de bascule soit atteint en 2012.

Cette année-là, deux doctorants de l'Université de Toronto, A. Krizhevsky, I. Sutskever[120] ainsi que leur directeur de thèse G. Hinton (2017) remportent haut la main le concours annuel ImageNet[121] avec des performances de classification jusqu'ici jamais vues. C'est un moment charnière dans l'arène scientifique, ressenti comme tel dès l'annonce des résultats du concours, dont un récit « coloré » est retranscrit par Cardon et ses collègues (2018:2-3). Cette rupture concerne l'histoire technique de l'IA, qui voit débuter un nouvel « été » sous les auspices de l'apprentissage profond (*deep learning*), mais elle concerne aussi

[117] Les cartes graphiques servent à produire une image affichable par un écran, et notamment des images 3D (telles que celles qu'on retrouve dans de nombreux jeux vidéo). C'est une activité très coûteuse du point de vue de la quantité de calculs, ce qui justifie que cette opération soit effectuée de façon séparée du reste de la carte mère.

[118] Cuda pour *Compute Unified Device Architecture*. Nous nous passerons de traduction en nous contentant d'en comprendre les grandes lignes.

[119] Le principe de base est assez intuitif. Lorsque l'on fait un calcul à la main, on découpe ce calcul en mini-calculs que l'on peut faire de tête, de façon séquentielle. Par exemple, pour une multiplication, nombre d'entre nous ont appris à multiplier d'abord l'un des nombres par les unités de l'autre, puis par le chiffre des dizaines (en ajoutant un zéro au bout !) etc. avant de sommer le tout. L'idée du calcul parallèle est de séparer les opérations indépendantes pour gagner du temps. Ce gain de temps rend possible la réalisation d'opérations plus complexes à des cadences plus élevées. Ces nouveaux modes de calcul sont typiquement ce qui est sous-entendu lorsque que quelqu'un explique en quoi l'augmentation des capacités de calcul ont rendu possible l'IA.

[120] Tout comme G. Hinton, I. Sutskever a affiché son adhésion pour les thèses concernant la perte de contrôle de l'IA vue comme une super-intelligence. Après avoir quitté OpenAI (dont il avait participé à évincer temporairement Sam Altman, son président (Metz 2024)), il a co-fondé une nouvelle startup, Safe Superintelligence, qui vise à créer une super-intelligence algorithmique sécurisée.

[121] Le nom complet du concours est *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge*, autrement dit, le concours de reconnaissance visuelle à grande échelle ImageNet. ImageNet est l'une des bases de données d'images les plus connues et les plus vastes du monde, qui sert de banc d'essai standardisé (*benchmark*) pour l'évaluation de nombreux algorithmes de reconnaissance d'images. Un article de R. Denton et ses collègues (2021) revient sur sa généalogie de façon critique : la présence de contenus douteux, incorrects, voire racistes et sexistes (au travers d'annotations inappropriées) y ayant été attestée (Crawford et Paglen 2019).

Nvidia. En citant la firme dans leur article, A. Krizhevsky, I. Sutskever et G. Hinton mettent l'entreprise sous les feux des projecteurs, et lui permettent de confirmer l'intérêt d'une ouverture vers un nouveau marché profitable : celui de l'IA.

Nvidia recentre petit à petit sa conception ainsi que sa communication sur les cartes graphiques pour l'IA. Le retentissement d'AlexNet constitue en cela une « rupture » dans la crédibilité des promesses qui portent sur l'IA, au sens de P.-B. Joly (2015) – plutôt qu' une rupture dans le caractère innovant des systèmes d'IA. L'utilisation de cartes graphiques pour alimenter des systèmes de traitement de données n'est pas nouvelle en 2012, mais c'est le moment où elle apparaît enfin crédible aux yeux de la communauté scientifique, et plus tard entrepreneuriale. Elle devient l'évidence du futur de la recherche. Dans un même moment, les méthodes d'apprentissage profond et les cartes graphiques qui servent à les faire fonctionner assoient la vraisemblance des promesses technoscientifiques qui portaient sur elles. L'industrie du semiconducteur devient alors soudainement le fournisseur de matières premières pour la fabrication matérielle de l'IA. Elle se rend capable de produire des micro-processeurs pour les calculs, certes, mais aussi des dispositifs de stockage, ou encore l'électronique nécessaire à l'alimentation des *data centers*. Son intérêt réside désormais dans la participation à l'engouement autour de l'IA, en fortifiant un nouveau cycle de promesses dont nous avons montré les excroissances dans les sections précédentes.

La loi de Moore ou la promesse comme passage de relai

Les avancées en apprentissage machine des années 2010 ont amorcé l'entrée des acteurs du semiconducteur dans la production des promesses de l'IA. Ce n'est pourtant pas là que débute la proximité entre ces deux secteurs économiques. En réalité, les entreprises de la micro-électronique ont contribué matériellement et discursivement à faire naître l'engouement autour de l'IA. Ce passage de relai est visibilisé par les instrumentalisations successives, dans les discours, de ce qu'on appelle aujourd'hui la loi de Moore. C'est ce que nous souhaitons montrer dans ce paragraphe.

Une version simplifiée de la loi de Moore pourrait par exemple énoncer que « le nombre de transistors[122] à volume égal double tous les dix-huit mois ». Pour le dire autrement, l'assertion énonce que la miniaturisation des dispositifs à semiconducteurs – processus dans lequel que l'industrie du semiconducteur s'est évertuée à maintenir – est telle qu'au bout de dix-huit mois, on peut mettre deux transistors là où on ne pouvait en mettre qu'un seul auparavant, voir (Figure 18).

S. Loeve (2015) retrace l'histoire de cette loi « constamment remixée », parfois considérée comme une loi empirique, pour montrer les différents statuts épistémiques qu'elle a endossé au fil des années. A l'origine, c'est une simple conjecture énoncée en 1965, sur la base de constatations empiriques, par Gordon Moore, alors ingénieur chez Fairchild Semiconductors (il fonde quelques années plus tard ce qui deviendra Intel). Alors que l'hypothèse semble se vérifier dans les années qui suivent, elle se mue petit à petit en horizon d'attente en forme de prophétie auto-réalisatrice, au sens où les acteurs du secteur

[122] Les transistors sont des dispositifs à semiconducteurs qui servent de brique de base de la micro-électronique.

tentent de s'y conformer au mieux[123]. Les velléités économiques toujours plus miniaturisantes jouent ainsi un rôle moteur dans le développement de l'industrie (Gruber 2000). Suivant les périodes, de sorte à faire correspondre la loi avec le réel, son contenu change : tant en ce qui concerne la fréquence des évolutions (tous les deux ans, tous les dix-huit mois) que ce qui est supposé évoluer cycliquement (vitesse des processeurs plutôt que quantité de transistors).

La loi de Moore finit par être institutionalisée[124] et devient une feuille de route (*roadmap*) qui permet aux acteurs du semiconducteur de mieux anticiper les évolutions techniques à venir dans une industrie relativement incertaine. Cette incertitude vient notamment des pertes très importantes subies lors de la mise en place de nouveaux procédés, qui demandent des calibrages très précis (Gruber 2000). Pour faire face à la compétition, ils s'embarquent dans des scénarii *More Moore* voire *More than Moore*[125] dans lesquels la loi de Moore perd son caractère de loi empirique. Elle devient une référence objectivée, potentiellement dépassable pour faire face à la concurrence. Elle peut aussi être présentée comme une barrière infranchissable. Dès les années 1980 en effet, des analystes font état d'un mur de Moore, sans cesse repoussé, dans l'hypothèse d'une incapacité à continuer à miniaturiser l'électronique pour des raisons physiques. Faire plus que Moore, dans ce contexte, peut revenir à développer de nouvelles fonctionnalités, de nouvelles formes de valeur ajoutée économique décorrélées de la miniaturisation.

La loi de Moore est un nouvel exemple de promesse, bien malgré elle et malgré son auteur, dont la spécificité est qu'elle n'est pas tant destinée à des consommateurs ou utilisateurs en bout de chaîne,

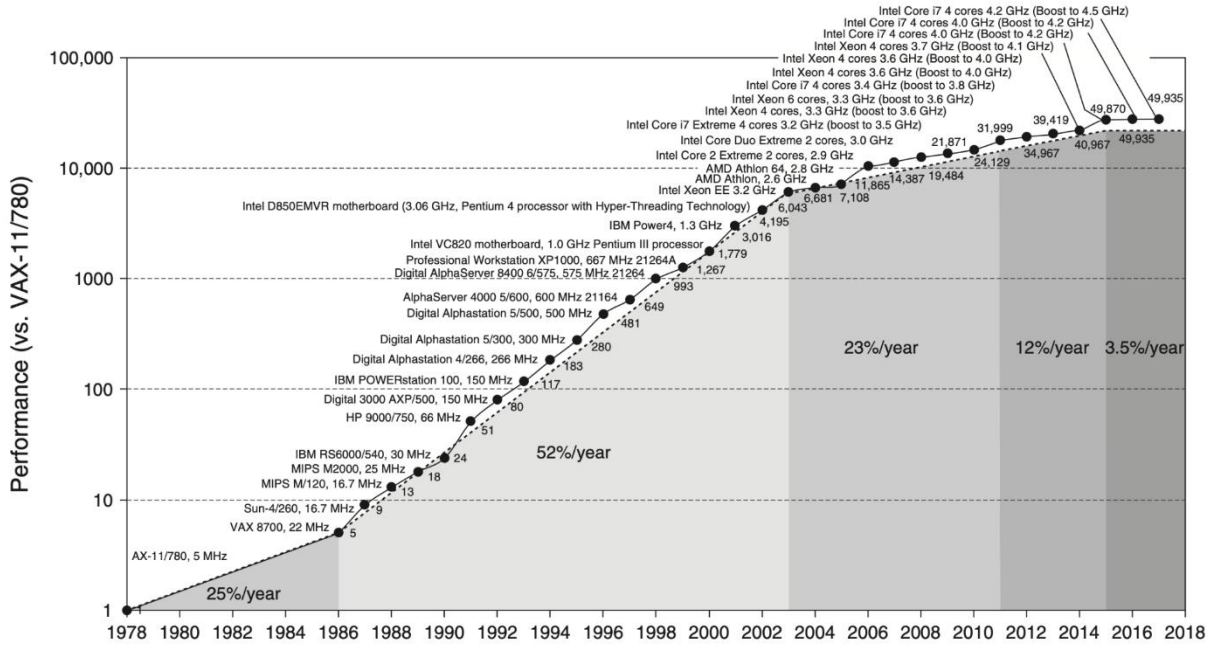


Figure 18 : L'une des représentations a posteriori de la loi de Moore (Hennessy et Patterson, 2017). Ici, c'est la performance de calcul qui est prise en compte comme variable d'évolution cyclique.

[123] La miniaturisation, explique S. Loeve, est d'abord une demande du secteur de l'armement militaire : il ne s'agit pas d'une nécessité technique en soi du point de vue de la conception des ordinateurs. Ce sont les capacités d'intégration qui l'ont rendue ensuite pertinente dans le domaine civil, car profitables économiquement.

[124] Cette institutionnalisation prend la forme de la création de la Feuille de route Technologique Nationale pour les Semiconducteurs (National Technology Roadmap for Semiconductors) rédigée par les acteurs de l'industrie du semiconducteur au sein d'organisations qui les rassemblent (Loeve 2015).

[125] « Plus de Moore » ou « Plus que Moore » (notre traduction).

mais plutôt aux acteurs industriels de la micro-électronique eux-mêmes. Elle leur a permis de se fixer des objectifs opérationnels à long-terme pour favoriser leur collaboration.

Quand la singularité s'approprie la loi de Moore

Quel rapport avec l'IA ? La réinterprétation de la loi de Moore a en fait fourni un ensemble de ressorts argumentatifs techniques en faveur du discours singularitariste sur l'IA, qui prévoit l'avènement d'une entité artificielle superintelligente capable de changer le rapport au monde de l'humanité. Pour le comprendre, il faut lire *The Singularity is Near*, de R. Kurzweil (2005), un ouvrage très influent au sein de la Silicon Valley. R. Kurzweil consacre de nombreuses pages de son livre à la loi de Moore dont il explicite les conditions d'énonciation et d'évolution. A grand renfort de schémas, il rend compte de la cyclicité de l'amélioration de la vitesse de calcul, de la taille, des extrants de l'industrie de la micro-électronique. Pourtant, R. Kurzweil ne croit pas en les limites de la loi de Moore. De son point de vue, celle-ci se prolongera indéfiniment, notamment grâce à l'informatique biologique (2005:185) ou encore à l'informatique quantique (2005:189). L'horizon d'une puissance de calcul quasiment infinie sert ensuite de base à R. Kurzweil pour justifier l'avènement de la singularité technologique et d'une entité artificielle omnipotente. Alors que vingt ans plus tard, les champs de recherche cités se situent encore à un niveau fondamental et qu'ils ne paraissent pas permettre de telles prouesses techniques, ces prédictions ne paraissent pas devoir se réaliser à court-terme (Seewald 2022). Mais après tout, ce n'est pas ici la question.

Ce que nous souhaitons souligner ici, c'est que le récit de la loi de Moore développé par l'industrie de la micro-électronique, envisageant (au moins schématiquement) une croissance exponentielle de la capacité de calcul, a pu servir d'argument aux discours de promotion de l'IA. Et ce sont par la suite ces discours qui ont permis d'investir l'imaginaire collectif en diffusant l'idée de systèmes d'IA naturellement efficaces et objectifs. L'ouroboros industriel et productif que nous décrivions dans la sous-section précédente, se double ainsi d'un ouroboros discursif. Les promesses de la micro-électronique et celles de l'IA se sont perpétuellement inter-alimentées, de sorte à faire converger les intérêts des deux secteurs. Comme le conclut S. Loeve dans son article, ces récits sont partiaux et gomment tout aspérité, de sorte qu'ils « vid[ent] le passé des contingences et des possibles qui l'ont constitué, et fabriquent ainsi un futur dans notre dos. » (2015:107). La prospérité de l'IA dans l'imaginaire collectif tient beaucoup à l'oubli et l'effacement des difficultés d'une discipline scientifique et de thèses qui n'ont pas toujours eu la cote, comme en témoignent les réguliers « hivers » de l'IA, dans les années 2000 par exemple (Cardon et al. 2018).

Au bilan, l'industrie du semiconducteur remplit l'ensemble des maillons de l'économie de la promesse de l'IA. Elle est à la fois une manufacture, une diffuseuse et surtout une double bénéficiaire des promesses de l'IA au sens où elle peut à la fois vendre des composants pour en fabriquer, et acheter des systèmes qui en sont dotés. Nous nous proposons d'illustrer cette dynamique en présentant un projet industriel européen qui vise justement à promouvoir des technologies nouvelles dans le domaine de l'IA.

3.c. Alimenter la promesse de l'IA à l'échelon européen : un cas d'étude autour d'un projet industriel européen

L'industrie du semiconducteur, dans son volet Recherche & Développement, est traditionnellement l'objet d'alliances inter-entreprises sous l'égide de l'Union Européenne (Ribeyre 1997). L'apport de financement se construit autour de programmes de recherche européens qui font interagir acteurs privés et laboratoires de recherche.

Depuis 1984, l'Union Européenne construit justement une politique commune autour de ses programmes-cadres de recherche et de développement technologique (PCRDT) successifs et multi-annuels. Elle investit pour cela des dizaines de milliards d'euros (Fedirko et Fedirko 2021). L'un des buts de ces programmes-cadres est de « combler le fossé de longue date entre la recherche européenne de grande qualité et la commercialisation des innovations » – un objectif que la Commission Européenne regrette de n'avoir pu pleinement remplir[126] avec le programme Horizon 2020 (Commission Européenne 2024:8). Pour ce faire, de larges projets sont mis sur pieds et réunis autour de consortium d'acteurs industriels et académiques. Nous avons eu l'occasion, au cours de notre enquête, d'interagir avec les membres de l'un d'eux, que nous appellerons le Projet, et nous proposons d'en restituer en partie la dynamique.

Un projet d'innovation européen

Le but du Projet est de concevoir des systèmes d'IA embarquée. Faire de l'IA embarquée a plusieurs avantages, parmi lesquels l'absence de communication vers l'extérieur : tous les calculs sont réalisés à l'intérieur du système. C'est un avantage au sens où les constructeurs peuvent ainsi garantir la non-interception des données, en particulier dans le cas d'applications sensibles (industrielles, militaires). Sur le plan de la seule consommation énergétique, ces systèmes sont également supposés être moins coûteux. Il s'agit d'un défi conséquent sur le plan technique, relevé par plusieurs dizaines d'acteurs inscrits dans le Projet, répartis dans différents pays de l'Union européenne, mais aussi en dehors. On y trouve aussi bien des multinationales que des petites ou moyennes entreprises et des universités. Financé à hauteur de plusieurs dizaines de millions d'euros (dont un quart par l'Union Européenne), le Projet figure parmi 35 000 autres accompagnés dans le cadre du PRCDT Horizon 2020 sur la période 2014-2020, pour un total de 75,6 milliards d'euros (Commission Européenne 2024).

Projets européens et promesses technoscientifiques

Ces projets européens constituent un volet du financement des états dans la production de la promesse, autant que dans sa réception. La communication qui entoure le Projet l'explicite d'emblée. Le logo du Projet intègre des éléments rappelant à la fois les caractères organique d'un cerveau et électronique d'un circuit, une ambiguïté entretenue dans la représentation de l'IA que nous avions décrite dans le premier chapitre. Ce résultat est intéressant car ce logo a été voté lors de son lancement par les membres réunis du consortium. Ce choix collectif dénote une somme d'intérêts individuels pour l'esthétique cérébrale de

[126] Comme l'explique I. Kustosz dans sa thèse, ces PRCDT participent malgré tout à soumettre l'activité de recherche à des logiques gestionnaires. Elle montre comment ils « constitue[nt un] modèle gestionnaire […] en termes de recherche d'opérationnalité, d'efficience et de diffusion du concept utilitariste de résolution de problème. » (Kustosz 2012:36-37).

l'IA de la part d'un public essentiellement constitué d'ingénieurs. Bien que sa communication visuelle[127] soit régulièrement illustrée par des images *stock* qui font le lien entre cognition humaine et IA, la métaphore n'est pas transcrite dans sa communication textuelle. L'IA y est plutôt envisagée comme un « segment techno-économique » (Benbouzid et al. 2022), un marché porteur car lié à de nombreuses applications technologiques pratiques. En d'autres termes, l'esthétique associée aux promesses techniques sert un argumentaire relatif aux promesses économiques de l'IA[128].

Les cas d'usage comme instruments de la preuve

Sous quel jour se montre le Projet ? Si des rapports (confidentiels) sont dus par les partenaires à la Commission Européenne[129], le Projet est plus concrètement rendu visible par ses cas d'usage (*use cases*). Ces cas d'usage sont des applications de l'IA embarquée portées par différents partenaires du consortium. Machine à laver connectée, surveillance et contrôle de serres agricoles, pilotage centralisé de véhicules pour l'industrie minière, ou encore reconnaissance d'empreinte digitale sont des exemples variés d'innovations mises en avant par le Projet. Les prototypes sont appelés « démonstrateurs » : les cas d'usage servent en fait de preuves en tant qu'ils démontrent le bon fonctionnement de la technologie qui les sous-tend. Ces démonstrations visent d'abord les évaluateurs du projet en participant à la « mise en évidence » non plus de « la faisabilité du projet », comme l'a noté l'anthropologue C. Rosental (2009), mais plutôt de sa réalisation effective. Les cas d'usage servent en quelque sorte de vitrine du succès technique du travail qui est réalisé dans le cadre du projet européen et permettent d'en accroître la visibilité (Rosental 2011).

Mais les cas d'usage ne constituent qu'une partie émergée de ce qui se joue sur le plan de la coopération entre les organisations impliquées. Le Projet est construit de sorte à intégrer des acteurs tout au long de la chaîne de réalisation de l'IA embarquée, des puces jusqu'aux applications – lesquelles n'en sont que le maillon final. Les rôles sont bien délimités : les acteurs de la micro-électronique, en lien avec des laboratoires de recherche publics ou publics-privés[130], sont chargés de réaliser de nouvelles puces, de sorte à optimiser (en termes de surface, de consommation, de puissance) les applications d'IA embarquée. Certains acteurs participent quant à eux à la caractérisation des meilleurs substrats pour la fabrication des dispositifs à semiconducteurs, tandis que d'autres planchent sur l'assemblage de ces dispositifs pour réaliser des briques de calcul ou de mémoire. L'ensemble forme un tout cohérent d'entreprises et de laboratoires réunis pour remplir un même objectif technologique, de la conception micro-électronique à l'application pratique, selon une chaîne huilée par un appareil de gestion de projet :

[127] Nous nous référons essentiellement, dans ce paragraphe, au site Internet du Projet et à des présentations ou posters montrés lors de conférences.

[128] Notons que, même pensée de façon stratégique, la communication de tels projets n'est pas forcément intentionnelle dans son relai d'une imagerie fantasmée de l'IA sortie des banques *stock*. Elle participe malgré tout à en propager une vision fallacieuse (Romele et Severo 2023).

[129] Des « officiers » sont chargés, en interne, d'évaluer les projets sur la base de leurs rapports d'avancement périodique, de livrables, d'indicateurs de performance (parmi lesquels nombre de publications, nombre de conférence, retard des livrables, proportion femme-homme) mais aussi de journées banalisées en forme de grands oraux.

[130] D. Vinck (2005) a montré comment les laboratoires de recherche ont progressivement été mis au service de la R&D industrielle privée.

work packages, livrables, réunions. Rassemblées en un réseau resserré, les firmes représentées dans le consortium se taillent une place de choix dans un écosystème d'acteurs à la pointe de l'innovation.

Les acteurs de l'industrie de la micro-électronique présents dans le Projet, en particulier, détiennent un rôle de pilotage qui les rend garants du versement des aides de l'Union Européenne aux autres partenaires. Ils sont ainsi des acteurs incontournables du consortium. Leur intérêt économique y est important : leur R&D interne est partiellement financée par l'Union Européenne, pour le développement de technologies du semiconducteur, mais aussi pour la conception d'un ensemble d'applications qui en dépendent directement. En un sens, les acteurs du Projet se rendent dépendants les uns des autres pour la réalisation d'applications d'IA embarquée. La promotion de l'IA permet dès lors à l'industrie de la micro-électronique de s'assurer une clientèle de fabricants d'IA, à savoir les autres membres du projet. Ces derniers y trouvent eux-mêmes leur compte en établissant des relations privilégiées avec leurs fournisseurs. La prise de risque associée à l'innovation s'en trouve réduite, car elle est accompagnée financièrement par des fonds publics, et organisationnellement par des clients-partenaires.

En plus de porter en eux la promesse de la possibilité technique, les cas d'usage concrets, matérialisés, témoignent ainsi d'un agencement technologique profitable économiquement à chacun des acteurs qui contribuent, et qu'ils ont permis de « mettre en rapport » (Rosental 2011). L'objectif est avant tout de nouer des partenariats économiques, et d'expérimenter techniquement dans un cadre souple, moins menacé par la mise en concurrence. L'intérêt intrinsèque de ces cas d'usage est finalement assez peu questionné tant qu'ils constituent des innovations aux yeux des membres du Projet, indépendamment de leur utilité réelle pour la communauté.

Conclusion (I.3)

Le positionnement de l'industrie du semiconducteur est central aussi bien dans l'économie mondiale que dans la production des promesses de l'IA.

Dans le contexte français, les années 2010 ont vu beaucoup d'entreprises du secteur être rachetées par des firmes étrangères, avant que la micro-électronique – au sortir de la pandémie de Covid qui a pu révéler certaines dépendances à des compagnies étrangères – ne redevienne une priorité sur les plans national et européen. Elle a fait l'objet de nombreuses collaborations entre industrie, recherches et état autour de programmes de R&D, soutenus par des financements publics et privés. L'industrie du semiconducteur contribue par ailleurs sur le plan discursif à l'ensemble des transformations numériques qu'elle conçoit pour elle-même. Elle participe à la diffusion des promesses du renouveau industriel (technologique et économique) qui passerait par le déploiement généralisé de systèmes d'IA. En cela, l'IA constitue pleinement un relai de croissance pour une industrie qui se veut à la pointe d'une innovation rendue (rhétoriquement) nécessaire.

Il ne suffit pourtant pas d'investisseurs, de concepteurs et de vendeurs pour qu'une technologie se déploie : la place des acheteurs dans la vie du produit-service est également à interroger. Les entreprises industrielles se dotent effectivement de l'IA, pour nombre d'entre elle. Quelles sont donc leurs motivations, et dans quelle mesure coïncident-elles avec les promesses qui leur ont été faites ?

C'est la réflexion que nous tenterons de mener dans le chapitre suivant. Après notre examen des promesses relatives à l'IA industrielle, nous verrons dorénavant comment elles pénètrent l'imaginaire collectif et individuel et s'y concrétisent. L'enjeu sera d'interroger l'interprétation des promesses de l'IA dans le contexte de projets de conception de systèmes d'IA, au sein de l'industrie de la micro-électronique et en dehors. Nous investiguerons la façon dont les promesses sont accueillies, et peuvent être instrumentalisées pour motiver le déploiement de systèmes d'IA dans des contextes de transformations organisationnelles.

Chapitre II – Diffusion, propagation, et appropriation des promesses de l'IA dans l'industrie du semiconducteur

Assis sur un banc en bois, je place sous chaque semelle de mes baskets une talonnière : c'est une bande magnétique que j'enroule et serre ensuite autour de mes chevilles[131]. Sans me déchausser, j'enfile ensuite des sur-chaussures en plastique. Les salariés qui passent devant moi n'ont pas besoin de le faire, ils ont leurs propres chaussons adaptés à l'environnement de la salle blanche. A ce stade, ma démarche est un peu gauche, ce n'est pas très confortable. Il me faut passer sur un tapis collant qui retient les poussières et me conduit dans le vestiaire. Après m'être désinfecté les mains, je mets des gants à usage unique parmi ceux qui sont disposés là, par taille, emballés dans des sachets à ouverture facile. Sur les étagères, je récupère une cagoule, une tenue à zipper et des surbottes, avec lesquelles je dois me vêtir dans cet ordre précis, en clipsant les pièces les unes aux autres, voir (Figure 19) pour un aperçu. Rien ne dépasse, je suis presque totalement plastifié ; les seules parcelles visibles de mon corps sont le bas de mon front, et mes yeux. Je flotte un peu dans ma tenue blanche, dont les dimensions sont standardisées. Devant le lecteur automatique, il ne me reste plus qu'à passer mon badge, lequel a suivi, en amont, un circuit de validation éreintant, à plusieurs niveaux hiérarchiques, pour me permettre d'accéder à la salle ce jour-là. Avant cela, ce matin, j'avais déjà dû le montrer à un gardien attentif à l'entrée du site, et passer par deux portiques magnétiques différents. En tout et pour tout, il faut bien compter une vingtaine de minutes entre le moment où je me suis présenté à l'entrée du site et celui où je



Figure 19 : L'équipement standard de la salle blanche, dessin et annotations par l'artiste Zélie (*https://zelie.fr/blog/*).

[131] Tout l'objectif de la talonnière est d'éviter de créer des charges électrostatiques résultant de frottements. Sans cette précaution, toucher un équipement pourrait endommager les composants micro-électroniques, très sensibles. Pour voir des exemples d'équipements spécialisés, consulter par exemple le site de l'entreprise suisse Abovo : *https://www.abovo.ch/fr/pour-en-savoir-plus/dangers-esd-salle-blanche/*.

rentre dans la salle blanche de SemiCorp. Voilà peu ou prou mon expérience[132] de l'accès à cet espace confidentiel, aseptisé (au sens très propre du terme), que peu de personnes ont finalement eu l'occasion de fouler.

Accéder à la fab, accéder au terrain

Cette difficulté physique à pénétrer dans l'antre de la conception des composants électroniques s'explique assez facilement. Les équipements de la salle blanche et les produits qui y sont fabriqués représentent des sommes considérables, tout autant que les processus de fabrication, confidentiels. Le secteur de la micro-électronique, nous aurons l'occasion d'y revenir, est concurrentiel et stratégique. En conséquence, l'environnement est hautement sécurisé. Il n'est pas si étonnant, dans ce contexte, que ce milieu confiné soit aussi faiblement investigué par les sciences sociales sur le plan empirique. A notre connaissance, peu d'études ethnographiques se sont aventurées sur ce terrain[133]. Parmi les pionnières dans le domaine, V. Blanc-Brude (2023) a récemment soutenu une thèse en sciences de gestion dans laquelle elle traite de la virtualisation du travail des opérateurs de salle blanche, progressivement éloignés de leur espace de travail habituel vers des salles de contrôle extérieures.

Dans un secteur privé où résident de nombreux enjeux économiques, l'accès libre au terrain n'est pas une évidence. En l'occurrence, si la présente thèse a pu investiguer ce sujet, ce n'est que grâce aux partenariats tissés avec des acteurs industriels soucieux d'une interaction avec la recherche en sciences sociales. Mais si chacun ne peut pénétrer dans un tel environnement de haute-technologie selon son bon vouloir, qu'en est-il des idées ? des promesses ?

La perception : étudier la vision de la technologie en amont du déploiement

Pour répondre à cette question, nous nous inscrirons dans le sillage des travaux qui portent sur la « perception » des technologies introduites dans les organisations (Leonardi et Barley 2010). Cette approche questionne les attitudes, les croyances et les valeurs des usagers vis-à-vis de la technologie. Pour ce faire, elle rend compte de la manière dont les membres d'une organisation en viennent à construire une vision commune de la technologie, qui peut ultimement faciliter son adoption ou son rejet.

Pour construire cette approche *a posteriori*, P. Leonardi et S. Barley citent plusieurs groupes d'études qui peuvent mêler démarches quantitatives et qualitatives. Certaines montrent l'influence de la vision des collègues sur la formation de l'opinion à propos des technologies (Schmitz et Fulk 1991)[134], là où d'autres montrent comment cette influence sociale peut devenir par elle-même un facteur causal de l'adoption de

[132] Je ne relate ici qu'un épisode où, déjà habitué de la phase d'équipement, je suis seul et assuré.

[133] Une recherche sur Web of Science avec la requête (*TS=(semi*conductor*) OR TS=(micro*electronic*)) AND TS=(industr*) AND WC=(Soc*)* réalisée le 2 octobre 2024 renvoie 93 publications. Après un examen des titres et des résumés, il apparaît qu'aucune d'entre elles ne propose de contenu qualitatif présentant une description de l'environnement de l'industrie du semiconducteur ou des conditions de travail.

[134] L'article étudie les appréciations d'un système de communication par e-mail. L'analyse montre une corrélation entre les avis des collègues qui l'utilisent, alors qu'une telle corrélation ne se vérifie pas entre salariés et partenaires externes qui utilisent pourtant le même outil de communication.

technologies (Kraut et al. 1998)[135]. Dans tous les cas, l'idée qu'une technologie serait uniquement adoptée parce qu'elle est supposée améliorer l'expérience de travail est largement contredite.

Lorsque les projets de déploiement de technologie ne sont pas à l'initiative des salariés eux-mêmes, il peut en effet exister un décalage entre la vision des acteurs à l'origine de l'implémentation de la technologie (hiérarchiquement plus haut placés) et celle de ceux qui la subissent. Pour recueillir, sous l'angle de la perception, des opinions relatives à des technologies émergentes, il est fréquent que les décideurs soient consultés. Dans le cadre des études du LaborIA[136], J. Condé et Y. Ferguson (2023) sont par exemple allés à la rencontre de personnes en charge de mettre en œuvre des projets d'IA (ou ayant au contraire choisi de ne pas s'engager dans cette voie). Ils ont pu souligner des différences dans les impacts envisagés par les preneurs de décisions, entre d'un côté ceux qui ont fait le choix de l'IA, et ceux qui, plus pessimistes, ne se sont pas orientés dans cette voie. Tout l'enjeu de certaines recherches est justement d'aller investiguer ces divergences de visions, qu'elles soient liées à la place de l'individu sondé dans la hiérarchie, ou à l'(absence d')introduction effective de ces technologies. Récemment par exemple, des travaux ont été menés au sein de l'industrie européenne de l'acier pour envisager le recours à des drones dans les activités de maintenance (Stroud et Weinel 2020). En interrogeant les ingénieurs et techniciens, les auteurs s'engagent avec eux dans une démarche prospective qui vient confronter travail réel et technologie telle qu'elle est imaginée. Leur enquête révèle par exemple des craintes concernant la sécurité[137], des effets sur le travail qui n'étaient pas attendus avant consultation.

En ce qui concerne notre étude, la méthode suivie ne permet pas d'établir des liens de causalité entre les promesses de l'IA dans l'industrie et le contenu du discours de nos enquêtés[138]. En revanche, nous pourrons au moins vérifier leurs (dis)similarités. Cet aspect est important, car c'est précisément dans le décalage existant entre promesses des technologies et transformations réelles des organisations que peuvent se nicher des inadéquations techniques ou organisationnelles (du point de vue des acteurs), voire de potentiels conflits. Ces orientations peuvent conduire à l'échec de ces projets, aussi bien du côté des déployeurs que des concernés par le déploiement.

---

[135] Alors que deux systèmes de téléphonie sont mis en compétition dans une entreprise, les auteurs cherchent à comprendre les raisons qui conduisent à l'adoption de l'un plutôt que de l'autre. Les résultats montrent qu'il est nécessaire de mettre en balance deux facteurs majoritaires d'adoption : l'impression d'utilité, et l'influence sociale. Mais un système est d'autant plus pratique à utiliser (et donc utile) lorsque des collègues proches l'utilisent eux-mêmes ; l'utilité est donc partiellement corrélée à l'influence sociale (qui par ailleurs peut elle-même résulter de premières impressions d'utilité)

[136] Le LaborIA est une initiative du Ministère du Travail français et de l'Inria (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique), lancée en 2021, qui cherche à investiguer les transformations du travail liées à l'IA. Les recherches menées dans le cadre du LaborIA ont donné lieu à plusieurs études, par exemple (Borel, Condé, et Ferguson 2024a; Condé et Ferguson 2023), qui ont permis d'alimenter la présente thèse.

[137] Les drones doivent par exemple être utilisés pour inspecter des potentielles fuites sur des conduites. L'un des ingénieurs s'inquiète du fait que le pilotage d'un drone nécessite de garder à la fois un œil sur le drone lui-même, mais aussi sur ce que le drone filme (Stroud et Weinel 2020:306).

[138] En ce sens, nous tenterons de ne pas tomber dans l'écueil de la quête d'une « influence » que rejette M. Foucault ([1969] 2008:34). Selon lui la notion, si elle donne l'air d'imprimer une forme de causalité, ne permet pas de rendre compte efficacement de la façon dont les promesses peuvent se concrétiser dans le discours quotidien. Notons en revanche que le concept « d'influence sociale » que nous avons évoqué plus haut, est quant à lui éprouvé théoriquement et empiriquement par un certain nombre de travaux, et notamment ceux de J. Fulk, J. Schmitz et leurs collègues.

Propos du chapitre et plan

Dans le chapitre précédent, nous avons caractérisé à l'échelle globale la façon dont l'histoire de l'IA s'est façonnée autour du régime de la promesse et comment celui-ci a, plus récemment, alimenté le récit du renouveau industriel. L'objet de ce chapitre est de changer d'échelle pour envisager leur propagation dans un monde professionnel industriel particulier : celui du semiconducteur. Nous chercherons à comprendre la façon dont les promesses de l'IA sont justement « perçues » par les acteurs de l'industrie, concernés dans leurs activités (qu'elles soient opérationnelles, managériales, gestionnaires), par le déploiement de ces technologies. Pour ce faire, nous chercherons à mobiliser les traces immatérielles – qui ne sont pas des « inscriptions » au sens de M. Akrich (1991) – des promesses, qui seront perçues dans le discours d'acteurs qui les reçoivent et cherchent à s'en saisir pour guider leur action, à l'échelle de leur propre organisation.

Avant de poursuivre une analyse de la diffusion et de la réception des promesses de l'IA dans ce secteur, nous nous proposons d'esquisser l'environnement de production et de travail dans l'industrie du semiconducteur en décrivant l'appareil productif de la micro-électronique comme un système sociotechnique complexe (1). Cette plongée nous permettra de comprendre dans quel univers évoluent les personnes que nous avons rencontrées, en tentant d'abord de clarifier les termes et processus techniques qui lui sont associés (1.a). Nous insisterons sur la forte médiation technique de cet environnement (1.b). Nous nous concentrerons enfin sur le travail du contrôle qualité vu comme un véritable travail d'investigation au sein de cette industrie (1.c).

Des éléments empiriques nous permettront ensuite de développer le contenu des représentations des managers et ingénieurs de l'industrie aux prises avec des projets de déploiement de systèmes d'IA (2). Nous explorerons à cette fin la circulation différenciée de représentations de l'IA entre les différentes échelles hiérarchiques dans un site de SemiCorp, où nous avons mené notre étude ethnographique (2.a). Nous montrerons qu'elles sont le résultat de différentes interprétations des promesses de l'IA dans l'industrie, à l'interface entre des rationalités concurrentes (2.b).

Nous évaluerons enfin la réception de ces promesses dans une entreprise particulière, Mecanex, qui ne figure pas parmi les acteurs archétypaux de l'économie de la promesse, tout en étant adossée, en tant que fournisseur d'équipements, à l'industrie du semiconducteur (3). Mecanex se voit engagée dans des processus d'innovation qui amène ses salariés à se questionner sur les promesses de l'IA et de la transformation de l'industrie. Nous présenterons d'abord le contexte organisationnel d'une entreprise en cours de servitisation (3.a). Nous nous attacherons ensuite, en miroir de la partie (**I.**2), à examiner la réception des différentes promesses que nous avons décrites. Nous reviendrons d'abord sur les promesses relatives à la temporalité du changement, qui, nous le verrons, sont intimement liées aux promesses de survie économique (3.b). Nous verrons ensuite un cas typique de rejet des promesses au travers du désamorçage de la comparaison humain-machine (3.c), avant de faire le constat d'une mise en débat des promesses liées au travail et à l'évolution des compétences (3.d). Nous conclurons en esquissant des pistes d'explication de la perméabilité relative de ces récits à Mecanex.

1. Dresser le tableau organisationnel de l'industrie de la micro-électronique

Des organisations complexes

L'industrie de la micro-électronique peut être abordée au travers de sa « complexité organisationnelle » (Dooley 2002). La complexité organisationnelle est définie par K. Dooley comme « le degré de différenciation qui existe entre les différents éléments qui constituent l'organisation[139] » (2002). La différenciation renvoie ici simplement à la différence qui existe entre les entités (individus, technologies, normes) qui composent l'organisation. L'un des indicateurs de cette complexité est celle de la variété des spécialisations professionnelles présentes dans l'organisation, ainsi que leur niveau de qualification. Plus il y a de métiers différents, plus ceux-ci sont spécialisés dans un domaine de compétence particulier, et plus l'organisation est complexe. De la même manière, on peut compter les technologies, les processus productifs, les clients, les marchés, les normes organisationnelles (formelles ou informelles) pour cartographier la complexité de l'organisation.

Différencier les échelles techniques

Contempler cette complexité *par le nombre* demande d'abord de spécifier les termes du sujet, justement nombreux. L'industrie du semiconducteur est, à l'échelle des activités industrielles de l'humanité, une relative nouveauté. Pour décrire l'industrie de l'électronique européenne, B. Paulré (1997a) suggère de considérer quatre groupes d'objets, schématisables à l'aide de cercles concentriques, voir (Figure 20).

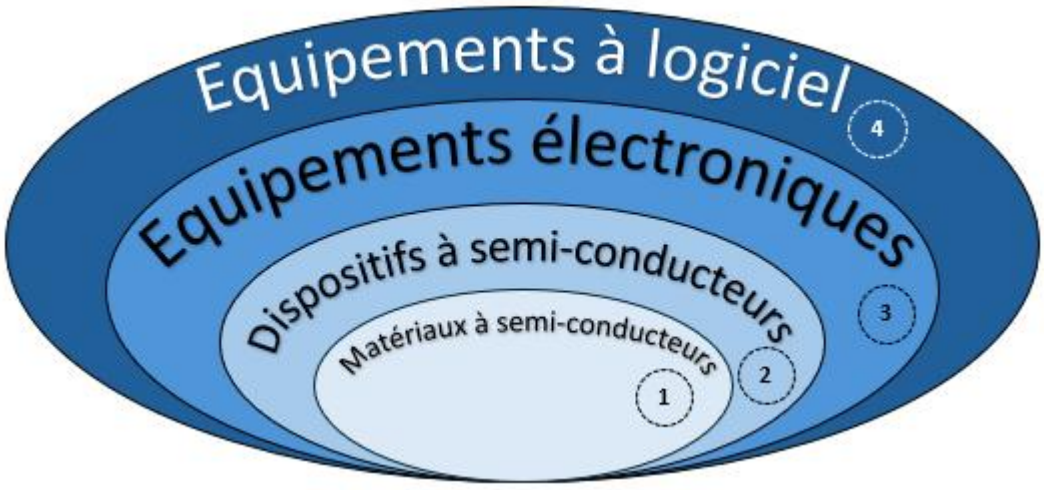


Figure 20 : Différentes catégories d'objets électroniques selon B. Paulré (1997a).
Lecture du graphique : les équipements électroniques incluent des dispositifs à semiconducteurs, lesquels comportent des matériaux à semiconducteurs.

Chacun de ces groupes correspond à une échelle différente, de la plus petite à la plus grande :

1. Les matériaux semiconducteurs.

[139] « The amount of differentiation that exists within different elements constituting the organization » (notre traduction).

2. Les dispositifs à semiconducteurs, incluant des composants à semiconducteurs simples (diodes, transistors) comme des circuits intégrés (parmi eux, les micro-processeurs) qui juxtaposent ces composants simples, parfois avec des systèmes de stockage de l'information (mémoires). On lit aussi *hardware*.
3. Les équipements, utilisables dans la vie de tous les jours, qui comportent des circuits intégrés.
4. Les logiciels (ou *software*), programmables, qui permettent d'opérer certaines fonctionnalités de ces équipements. Tous les équipements électroniques n'en disposent pas.

Pour B. Paulré, il y a presque trente ans, l'industrie de l'électronique correspond essentiellement aux trois premiers groupes, bien que la nomenclature française y inclût aussi le quatrième. Dans notre cas, nous réduirons l'industrie de la micro-électronique aux deux premiers types de produits, et, par abus de langage, considérerons qu'elle est synonyme d'industrie du semiconducteur.

Caractériser les interdépendances

Dans le livre Normal Accidents (2011), le sociologue des organisations C. Perrow va plus loin que K. Dooley en intégrant dans son analyse les interdépendances entre les différents acteurs (mais aussi objets techniques) qui composent l'organisation. C'est la faillite à pouvoir diagnostiquer ces interdépendances, pas toujours prévisibles si l'on s'en tient à l'organisation formelle du travail, qui serait selon lui l'une des causes majeures des accidents. Parmi les propriétés des systèmes complexes (en comparaison avec des systèmes qualifiés de linéaires), C. Perrow note certaines particularités : (1) accès à l'information de façon indirecte, (2) forte spécialisation des salariés, (3) compréhension limitée des processus de travail, (4) contrôle des procédés.

En ce qui concerne l'industrie du semiconducteur, ces éléments se vérifient en effet, et nous nous proposons de les détailler dans la suite de cette section. Nous tâcherons de lier ces éléments de « complexité organisationnelle » à des caractéristiques matérielles des produits de l'industrie de la micro-électronique. Qu'est-ce qu'un dispositif à semiconducteur (1.a) ? et comment en fabrique-t-on (1.b) ? Ces questions, auxquelles nous apporterons les réponses les plus pédagogiques possibles[140], sont essentielles pour bien saisir la matérialité de cette industrie. Ce prérequis, à la limite de l'encyclopédique, nous paraît déterminant pour bien comprendre les expériences de déploiement de technologie, et plus généralement les expériences de travail dans ce milieu. Nous détaillerons en particulier les enjeux du service Qualité qui, au sein de cet environnement technologique, fournit un véritable travail d'investigation (1.c).

[140] Quand elles ne sont pas explicitement sourcées, les explications techniques présentées dans la suite se basent sur les pages Wikipédia rédigées sur le sujet, relativement bien faites si l'on a un peu de temps et quelques connaissances de base en électronique. En particulier, voir la page dédiée aux matériaux semiconducteurs (*https://fr.wikipedia.org/wiki/Semiconducteur*) et toutes celles auxquelles elle mène via lien hypertexte.

1.a. Eléments préliminaires concernant les dispositifs à semiconducteurs

Le terme de semiconducteur n'est pas très intuitif. Lorsque l'on place un brin d'herbe sur une clôture électrique pour vérifier si elle est en marche, le brin d'herbe conduit. Il conduit faiblement, on ne prend pas la décharge, mais il n'est pas non plus isolant. Ce n'est pas un semiconducteur pour autant. Nous nous proposons d'expliciter ce que sont les semiconducteurs, et de montrer comment leur agencement permet justement de produire les composants électroniques.

Les matériaux semiconducteurs

Les semiconducteurs (groupe 1 dans la Figure 20) sont des matériaux particuliers, qui possèdent certaines des propriétés des métaux, mais aussi des non-métaux. Ils peuvent tout aussi bien servir de conducteur que d'isolant, selon les conditions dans lesquelles ils sont placés. Leur histoire peut être retracée jusqu'aux expériences du physicien anglais Michael Faraday en 1833 (Renard 1963). Celui-ci remarque que certains matériaux ont des propriétés étonnantes : ils conduisent d'autant mieux l'électricité que la température augmente – pour les métaux, c'est l'inverse. D'autres physiciens notent, séparément, d'autres caractéristiques de ces matériaux un peu spéciaux (Renard 1963) : certains d'entre eux produisent une tension sous un éclairage (effet photo-électrique interne) quand d'autres voient leur résistance diminuer lorsqu'ils sont soumis à la lumière (phénomène de photo-conductivité). Une autre découverte est celle de l'effet de redressement : la résistance de certains matériaux ne suit pas la loi d'Ohm[141] et dépend de la nature du signal qui la traverse. Cette particularité fait que les semiconducteurs sont aujourd'hui des matériaux de choix pour fabriquer des composants à semiconducteurs (groupe 2) comme les diodes (électro-luminescentes ou non), qui ne laissent passer le courant que dans un sens, et que l'on retrouve dans les phares de voiture par exemple (Orton 2009).

Des semiconducteurs aux transistors

Un autre composant à semiconducteurs crucial pour l'industrie de la micro-électronique est le transistor (groupe 2). J. Orton (2009) en propose une histoire détaillée, décrivant hyperboliquement son invention comme « l'une des plus traumatisantes innovations technologiques de l'humanité » (Orton 2009:57)[142], tant son exploitation aurait affecté le mode de vie des sociétés modernes. C'est au sortir de la Seconde Guerre mondiale, en 1947, qu'est fabriqué le premier transistor au sein des Bell Telephone Laboratories. Ces recherches sont encouragées par les Etats-Unis qui perçoivent rapidement l'intérêt de ces dispositifs dans le cadre de leurs programmes militaires et aérospatiaux qui, dans les années 1960, alimenteront les carnets de commande des premières firmes du secteur (Miller 2022).

Les transistors sont constitués de matériaux semiconducteurs dopés, c'est-à-dire altérés par des impuretés qui modifient leurs propriétés de conductivité. L'un des matériaux semiconducteurs les plus utilisés est le silicium. C'est un élément chimique à la base de la silice (SiO_2, dioxyde de silicium), qui

[141] La loi d'Ohm énonce que la tension aux bornes d'un dipôle est proportionnelle à la résistance de celui-ci par rapport à l'intensité du courant qui le traverse.

[142] « The invention of the transistor shortly before Christmas in 1947 must rank as one of the most traumatic of man's technological innovations, certainly to be bracketed with the discovery of the wheel in its long-term effect on his way of life » (notre traduction). Voir le chapitre 3 du livre de J. Orton pour une histoire plus détaillée – et moins sensationnaliste que ce que ce morceau choisi pourrait laisser croire.

constitue l'essentiel des plages de sable fin. Il donne d'ailleurs son nom à la Silicon Valley : la vallée du silicium. Ces transistors permettent de piloter de façon plus ou moins fine les signaux qui leur sont présentés en entrée, voir (Figure 21). Agencés dans des circuits spécifiques, ils peuvent typiquement servir d'interrupteurs commandés par un courant. Les propriétés des transistors rendent possible la création de portes logiques (ET, OU, NON), lesquelles sont à la base de l'électronique numérique. Pour le dire plus simplement, le transistor rend possible la programmation à partir de l'électricité.

Tous ces éléments sont petits (de l'ordre du micro- / nanomètre aujourd'hui), et d'autant plus petits que l'industrie du semiconducteur est parvenue à les miniaturiser tout au long des soixante dernières années. C'est pourquoi des dispositifs de calcul puissants tiennent aujourd'hui dans des poches. Ce rétrécissement n'est pas issu d'innovations sérendipiteuses, il est plutôt le fruit d'une coordination entre les acteurs de la micro-électronique, qui ont institutionalisé la loi de Moore (Loeve 2015), laquelle énonce de façon empirique le rythme de miniaturisation des transistors (**I.**3.b).

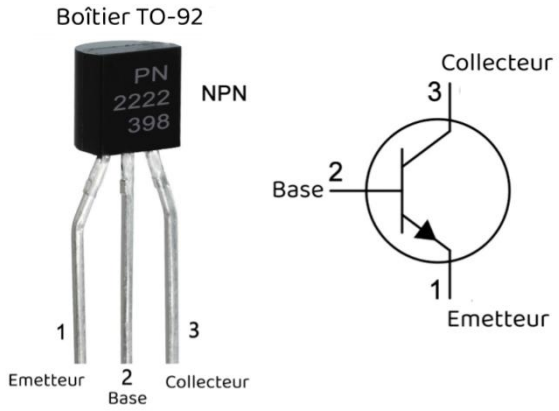


Figure 21 : Un exemple de transistor NPN et sa schématisation, par NitraThor (*https://www.nitrathor.fr/fiches/transistor*).

Protéger la production des producteurs

La petitesse technique de ces dispositifs demande de nombreuses précautions dans les processus de fabrication. La minutie requise est telle qu'elle ne peut être systématiquement couronnée de succès. En vérité, elle est l'une des sources de la forte incertitude qui pèse sur l'industrie. Les machines qui sont utilisées opèrent à des échelles de l'ordre du micro- voire du nanomètre. Une simple poussière peut suffire à ruiner une plaque.

C'est de cette vulnérabilité, d'une sensibilité à la moindre perturbation (angle ou positionnement de l'appareil de gravure, écart de température ou d'humidité, présence d'une particule), que proviennent les exigences en termes de dissimulation du corps que nous évoquions en introduction de ce chapitre. La tenue impersonnalise et rend difficile la reconnaissance des personnes qui n'auraient été croisées qu'avec leur tenue. En retour, pour les salariés de la salle blanche, elle met chacun sur un pied d'égalité et facilite les échanges (Blanc-Brude et Defélix 2023).

En réalité, dans l'industrie de la micro-électronique, le corps constitue un risque, au même titre que dans les blocs opératoires par exemple. Les équipements de protection individuelle (EPI) se révèlent être une « deuxième peau » (Francequin 2008), quasiment au sens propre : après avoir retiré un gant à la fin d'une journée d'enquête (environ huit heures), ma peau a macéré dans la sueur et est toute fripée, comme en

sortant de la piscine. Mais là où la deuxième peau des électriciens les protège des chocs électriques, la deuxième peau des travailleurs de la micro-électronique protège leur environnement d'eux-mêmes. Les risques associés à l'industrie du semiconducteur ne sont pas spécialement résolus par le port de ces combinaisons, qui servent avant tout à éviter la dissémination de particules textiles ou corporelles. Une étude en ergonomie sur les conditions de travail en salle blanche montre par exemple que les risques majeurs relevés par les salariés[143] concernent les troubles musculo-squelettiques, la fatigue visuelle et les maux de tête (Wong et Richardson 2010).

La salle blanche reste tout de même un environnement dangereux : l'industrie de la micro-électronique est avant tout une industrie chimique (Lécuyer 2017), qui manipule de nombreuses substances toxiques (gaz surtout). Les travaux de C. Lécuyer ont montré qu'avant la prise au sérieux des problèmes liés à l'environnement et à la santé, l'industrie du semiconducteur de la Silicon Valley était coutumière des incendies (incluant des gaz toxiques) dans le début des années 1980. L'industrie a été réticente à s'adapter, et ce n'est que grâce à l'activisme local et à la pression des sapeurs-pompiers (directement mis en danger par les incendies), conjuguées à l'évolution progressive de l'opinion publique, que la législation a pu évoluer (Lécuyer 2017).

Les circuits intégrés

Changeons à nouveau d'échelle. Les transistors peuvent être assemblés, connectés, ainsi qu'avec d'autres composants à semiconducteur, pour former ce qu'on appelle un circuit intégré. Ces circuits intégrés prennent généralement la forme de puces électroniques à plusieurs pattes, que l'on peut relier avec d'autres éléments d'un circuit électronique, voir (Figure 22). Ils y sont agencés de sorte à remplir une fonction particulière. Certains circuits intégrés amplifient un signal, d'autres le modulent, mais il est possible d'obtenir des fonctions plus poussées : stockage d'information, traitement de calculs. Fabriqués à partir des années 1960, ces dispositifs sont d'abord exclusivement prévus pour des usages militaires : missiles balistiques, lancement de fusée dans le cadre du programme Apollo (MacKenzie 2001).

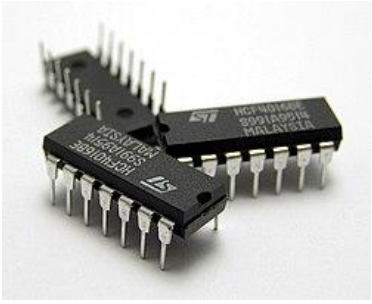


Figure 22 : Trois circuits intégrés, dans des puces électroniques (image Wikipédia).

En 1971, l'entreprise Intel fabrique le premier micro-processeur, c'est-à-dire la première unité de traitement de l'information complète (processeur) qui tienne sur une seule puce électronique. Cet

[143] Plus récemment, des accidents (rares) ont pu être recensés sur la base de données gouvernementale ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) : *https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/*. Ils sont liés à des fuites de gaz (n°10783), pouvant provoquer des incendies (n° 20835, 26060), générer des nuages toxiques vers l'extérieur (n° 11190, aux Etats-Unis)), voire être la cause de décès (n°111, en 1989, au Japon). Si ces risques peuvent être sous-estimés par les salariés, c'est aussi parce qu'un travail important est mené autour de mesures de sécurité qui visent à protéger l'environnement de travail.

événement est considéré par certains analystes comme un jalon essentiel dans le basculement vers un nouvel « âge de l'information » (Perez et Leach 2022a), bien qu'il poursuive, comme on peut déjà le sentir au travers de l'histoire partielle que nous dressons, les desseins de miniaturisation et d'automatisation du calcul déjà amorcées avec l'invention du transistor. L'invention des micro-processeurs préfigure l'avènement des ordinateurs électroniques de taille accessible[144], voire miniature (d'où les objets connectés contemporains qui intègrent en quelque sorte des mini-ordinateurs), mais aussi, plus généralement, la fabrication d'objets électroniques divers et notamment électro-ménagers (groupe 3).

Une complexité intimidante et une langue qui s'adapte

La complexité purement technique des produits de l'industrie de la micro-électronique peut impressionner. On parle d'assemblages de transistors, de dispositifs à semiconducteurs, trop petits pour pouvoir les voir à l'œil nu, fonctionnant sur la base de phénomènes physiques pas nécessairement intuitifs. Une couche de complexité supplémentaire provient de la façon dont on y parle, et dont on en parle. L'environnement du semiconducteur dispose de ses propres termes. Le jargon utilisé par les salariés du domaine, quelle que soit leur position hiérarchique[145], accentue complètement, pour le nouveau venu, le sentiment d'entrer dans un monde autre, avec un vocabulaire qui lui est propre. Les termes absents du dictionnaire sont nombreux dans les bouches. Ils qualifient des machines, des procédés, des produits, mais aussi les statuts des salariés dont les rôles sont qualifiés par des acronymes anglicisés. Le tout constitue une porte d'entrée difficile à pousser. Mes premières interactions avec des salariés de SemiCorp ont été ponctuées de nombreuses incompréhensions et demandes de clarifications.

Lors de mes premières heures en salle blanche, j'accompagne Julia, une technicienne expérimentée. Pendant qu'elle travaille, assise sur une chaise à roulettes à côté de moi, elle m'explique en quoi consiste son métier. Elle utilise beaucoup de termes techniques que je ne connais pas, alors même qu'elle fournit des efforts visibles (et appréciés) de pédagogie. En s'en rendant compte, elle me dit : « T'as ton langage pour clarifier les choses, et t'as le langage SemiCorp.[146] » Face à un profane comme moi, elle ajuste alors son degré de précision. Le langage utilisé en interne fait ainsi l'objet d'un apprentissage, puis de pratiques d'appropriation, et enfin d'un travail d'ajustement lorsqu'il faut s'adresser à un interlocuteur peu coutumier du jargon local. Pour certains autres enquêtés (minoritaires) en revanche, les ramifications de cette complexité linguistique sont complètement intégrées. Bien que s'adressant à des enquêteurs qu'ils savent peu au fait du domaine, ils ne prennent pas nécessairement la peine de clarifier les termes utilisés, probablement car ils leur sont devenus si familiers que les expliquer ne leur vient pas même à l'esprit.

144 L'ENIAC, sur lequel a travaillé John Von Neumann mais aussi des dizaines de techniciens et techniciennes, comme le relate Florian Jaton (2020:3), est considéré comme un des premiers ordinateurs électroniques. Finalisé dans une première version en 1945, il ne dispose pas de transistors, qui n'ont pas encore été inventés : d'où son envergure immense (il pèse près de 27 tonnes), puisque ses circuits logiques sont construits à partir de longs tubes électroniques.

145 Les vocabulaires utilisés ne sont pas les mêmes. Proches du terrain, les opérateurs, techniciens, ingénieurs recourent à des termes relativement techniques. Si on peut retrouver certains d'entre eux dans la bouche des managers plus haut placés dans la hiérarchie, le registre s'enrichit également d'un jargon managérial anglicisé.

146 Propos recueillis lors d'une session d'observation en février 2023.

1.b. Micro-électronique, maxi-loupes : fabriquer les semiconducteurs dans un univers technologiquement médié

Comment fabrique-t-on ces dispositifs micro-électroniques ? C'est tout l'objet de la sous-section qui suit. Pour sortir de l'écueil d'une description trop encyclopédique, nous tâcherons de montrer comment la perception du processus de fabrication intègre une forte « médiation technologique » (Verbeek 2016). Ce concept issu des travaux en post-phénoménologie caractérise la façon dont la technologie peut former, orienter, altérer la représentation du réel par son utilisateur. Pour la majorité des salariés de l'industrie du semiconducteur, il est finalement assez rare de voir cette fabrication de leurs propres yeux. Tout se passe à distance, *via* des technologies de visualisation, qui recentrent la sensibilité de l'essentiel des salariés vers un « travail du regard » (Moricot 2020).

Fabrication des wafers

La brique de base pour l'industrie de la micro-électronique est le *wafer* (ou plaque voir (Figure 23)). La majorité des unités de production de plaques recourent à du silicium, un élément chimique semiconducteur. Si, comme nous l'avons dit, le silicium est naturellement présent dans le sable (sous une forme moléculaire), l'industrie de la micro-électronique demande des niveaux de pureté qui ne permettent pas d'utiliser le sable de plage. La production de silicium se trouve en fait dépendante de l'exploitation de carrières, notamment celle de Spruce Pine, aux Etats-Unis[147]. La transformation du sable en silicium se décline selon une suite d'opérations relativement gourmandes en énergie. Le sable doit être fondu à de très hautes températures, et purifié chimiquement à plusieurs reprises (Intel s. d.). Le lingot ainsi obtenu est découpé pour être mis sous la forme d'un cylindre (typiquement, de 200 à 300 millimètres de diamètre) qui est ensuite saucissonné en tranches d'environ 1 millimètre de largeur. Chacune de ces tranches est un *wafer*.

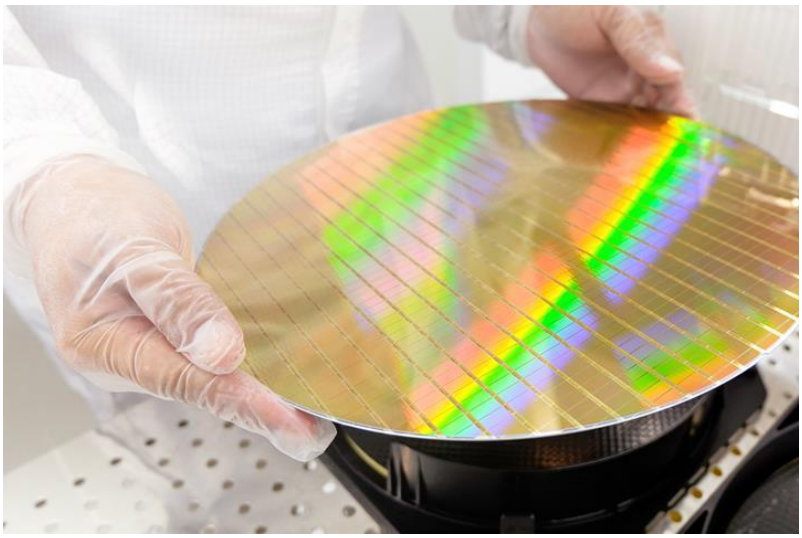


Figure 23 : Un *wafer* tenu à la main. Contenu promotionnel de l'entreprise étasunienne Chemours, spécialisée notamment dans la production de fluoropolymères, des fluides qui permettent de protéger les plaques durant leur fabrication.

[147] Le silicium suffisamment pur pour pouvoir servir de matière première est rare, ce qui pose un problème pour la filière d'approvisionnement qui se trouve très dépendante d'une poignée de sites d'extraction. Les carrières peuvent elles-mêmes être affectées par des aléas météorologiques (Mann 2024).

Ces plaques sont constituées de matière inobservable à l'œil nu et sont altérées par une série d'opérations conséquentes qui relèvent de phénomènes physiques dont on ne peut faire l'expérience sensible sans intermédiaire technique. Ces caractéristiques induisent, comme me le confie Antoine, technicien qualité, des difficultés de représentation : « C'est difficile de se rendre compte du process parce qu'on voit rien, on voit pas les plaques. […] C'est assez abstrait comme production. […] Faut être capable de reproduire dans l'espace ce qui se passe dans chaque atelier. Faut se faire un schéma dans sa tête[148]. » L'intangibilité de ce « nanomonde » est compensée par un fort recours à des techniques d'imagerie sophistiquées (Loeve 2011), qui sont autant de sources d'informations indirectes, pour reprendre la nomenclature de C. Perrow. Divers dispositifs servent à capter l'image (microscope électronique à balayage par exemple) puis à la transformer de sorte à la rendre accessible à la vue, et interprétable. Ce que perçoivent la plupart des salariés – qui travaillent essentiellement sur ordinateur – est une représentation médiée de la réalité, laquelle a souvent suivi plusieurs traitements d'image avant d'apparaître à leurs yeux. Ces images synthétiques constituent l'essentiel de la façon dont est appréhendée la matérialité de cette industrie, même par les salariés, et d'autant plus qu'ils sont éloignés des flux de production. Les instruments de captation d'images, puis les logiciels qui traitent ces dernières pour les rendre visible, entretiennent ainsi une « relation herméneutique » avec leurs utilisateurs, au sens de D. Ihde (1990). Elles construisent en effet une représentation particulière du monde, laquelle affecte l'utilisateur dans sa façon d'envisager son action au sein de l'organisation[149].

Il n'est pas rare par exemple d'entendre parler d'une « plaque bleue » pour qualifier un *wafer* largement défectueux. Cela ne vient pas du fait que les plaques pleines de défauts soient bleues : au contraire, elles sont pour la plupart indiscernables des autres à l'œil nu. La plupart des logiciels utilisés indiquent un défaut par un petit carré bleu. Une plaque est ainsi dite bleue parce que les logiciels communément utilisés la représentent de cette manière, voir (Figure 24)[150].

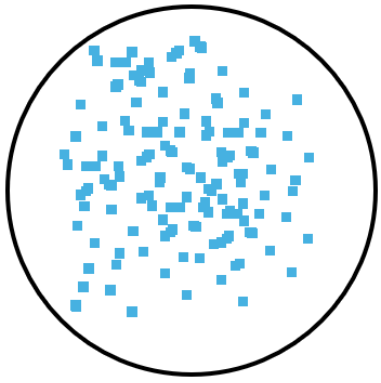


Figure 24 : Un exemple de « plaque bleue » telle qu'un logiciel de visualisation pourrait la présenter (reproduction).

[148] Propos recueillis lors d'une session d'observation en février 2023.

[149] Comme le souligne H. Kaji (2020), la post-phénoménologie de D. Ihde ne suppose pas un déterminisme technologique, au sens où la technologie médie la relation entre l'utilisateur et son environnement sans la déterminer complètement. Pour D. Ihde, des facteurs culturels entrent également en jeu pour qualifier l'appropriation de la technologie. En même temps, et à l'instar de la théorie socio-matérielle, il réfute le réductionnisme social.

[150] Contrairement à ce que laisseront penser l'ensemble des représentations de *wafers* dans cette thèse, ceux-ci ne sont pas totalement circulaires. Ils comportent en réalité un bord légèrement aplati. Dire « en haut », ou « à

Fabrication des circuit intégrés

Revenons à des questions pratiques : comment transforme-t-on un *wafer* en puce électronique ? Nous proposons une description du processus de fabrication ci-dessous. Outre un objectif pédagogique assumé qui demande à ne pas entrer dans le détail, plusieurs raisons justifient l'imprécision d'une telle description. Une première raison tient de la confidentialité de ces procédés, dont les détails sont jalousement conservés. La seconde raison est que ces procédés sont eux-mêmes d'une immense complexité[151]. La complexité est d'abord quantitative, puisque nos interlocuteurs sur site évoquent plusieurs centaines d'étapes de fabrication. Elle est aussi qualitative, car les techniques utilisées font appel à des phénomènes physiques opérant à des échelles microscopiques voire nanométriques que nous ne saurions restituer avec exactitude. Une troisième raison renvoie enfin à la grande variété des procédés utilisés, entre dopage, gravure, dépôt, traitements thermique et photolithographique.

Nous proposons d'esquisser une séquence générale de la fabrication des circuits intégrés et d'expliciter quelques-uns de ces termes, voir pour cela (Figure 25)[152]. Pour des explications plus précises, nous renvoyons à la thèse d'A. Villard (2012).

Un premier ensemble d'étapes de fabrication concerne ce qu'on appelle le substrat. Il s'agit du matériau semiconducteur brut qui est préparé – et notamment dopé – en anticipation des opérations de transformation suivantes.

L'une des étapes clés de la fabrication est la photolithographie. Elle vise à préparer le terrain pour la gravure (retrait de matière) puis le dépôt (ajout de matière). Comme ces opérations sont réalisées à des échelles trop petites, il n'est pas possible de réaliser ces opérations mécaniquement, avec une pointe par exemple. Des procédés utilisant des réactions chimiques et des mécanismes physiques permettent de contourner ces problèmes, il est intéressant d'en rendre compte pour bien comprendre ce qui se joue dans la salle blanche.

En préparation de la photolithographie, une fine couche de photorésine est appliquée uniformément de sorte à recouvrir la plaque. Cette photorésine sert à protéger certaines portions la plaque pour que la matière n'y soit pas retirée au moment de la gravure. Son avantage est d'être un matériau sensible à certaines fréquences de radiation lumineuse. Des rayons ultra-violets peuvent être émis pour produire une réaction chimique avec la résine, qu'il est ensuite possible de retirer grâce à d'autres procédés

droite » n'a pas de sens sur des plaques totalement circulaires : la présence de ce bord aplati facilite la coordination en donnant des repères communs aux salariés comme aux machines.

151 La seconde raison facilite en fait la première. Le cloisonnement entre le périmètre de savoirs des salariés est une façon de garantir la confidentialité des connaissances qui y sont produites. Une telle organisation segmentée rappelle le travail d'A.-C. Lange (2016) dans les cabinets de trading à haute-fréquence, où la division du travail est telle que les traders ne communiquent pas entre eux (seulement avec leur développeur attitré), d'autant qu'ils n'ont qu'une compréhension superficielle des modèles qu'ils utilisent. La chercheuse montre comment l'organisation du cabinet réplique l'aspect boîte noire des algorithmes sur lesquels travaillent les développeurs.

152 L'infographie est produite par le journal Libération (Clair et Guillot 2023), à partir d'informations données par ASML, une entreprise néerlandaise, issue de Philips, spécialisée dans la fabrication de machines de photolithographie, et qui fournit notamment des firmes comme Intel, Samsung Electronics ou TSMC (Escande 2021). Pour une illustration plus précise, en images, voir les explications de B. Corroy à partir d'images fournies par l'entreprise étasunienne Intel : *https://www.tomshardware.fr/diapo-la-fabrication-dun-processeur-expliquee-en-images/*.

chimiques. L'objectif cependant n'est pas d'enlever toute la photorésine qui vient d'être appliquée, mais seulement une partie. C'est pourquoi les rayons UV ne sont pas projetés sur toute la plaque : un masque est positionné en amont de l'émission des rayons de sorte que seulement certaines portions de la photorésine soient exposées. Cela permet d'imprimer, en négatif, un motif[153] sur la plaque. Le matériau semiconducteur non recouvert par la photorésine (non protégé de façon intentionnelle) peut ensuite être soumis à d'autres opérations.

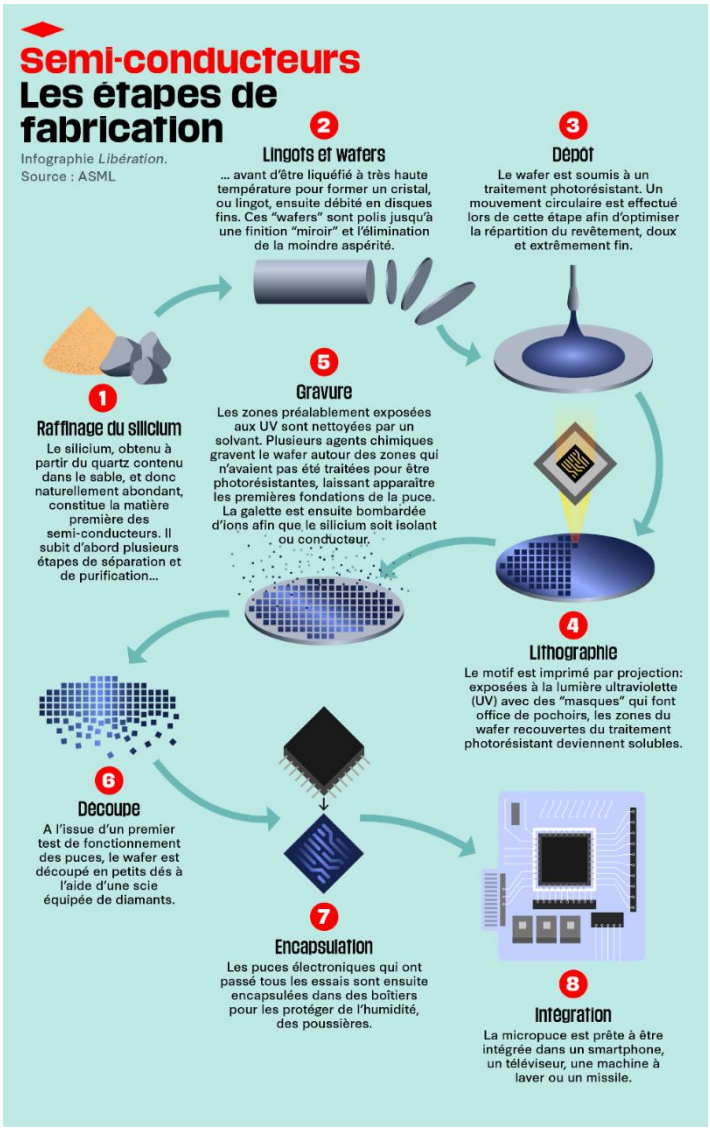


Figure 25 : Processus de fabrication des dispositifs à semiconducteur (Clair et Guillot, 2023).

Le procédé de photolithographie peut être itéré tout au long de ce pan *front end* de la fabrication, de sorte à pouvoir réaliser de nouvelles opérations sur la plaque : dépôt d'électrodes, isolation des transistors les uns des autres, gravure de circuits. Couche par couche, les circuits intégrés sont formés. Une fois l'ensemble des opérations de gravure et de nettoyage terminées[154], lors de la phase de production *back*

[153] Attention, ici « motif » n'a rien à voir avec les motifs de défauts dont nous parlerons plus tard : ce n'est pas le motif du glossaire.

[154] Ces opérations techniques ne sont pas anodines. Des années 1950 aux années 1970, le recours à des solvants et à des gaz de combat (utilisés notamment lors de la Première guerre mondiale) pour le dopage et le nettoyage des plaques, s'est fait dans de nombreuses entreprises sans attention particulière pour la santé. Des contestations

end, les circuits sont connectés les uns aux autres et la plaque est finalement découpée. Chacun des circuits distincts qui la constituent sont ensuite encapsulés dans des petits boîtiers en plastique, les puces électroniques, qui pourront elles-mêmes être intégrées dans un objet électronique.

On le comprend, il existe de très nombreuses étapes de fabrication, lesquelles font appel à des techniques, des machines et des phénomènes physiques bien différents. Une telle abondance technoscientifique participe à produire, conjointement avec l'organisation du travail, une forme d'éloignement des salariés par rapport au fruit de leur travail. Cet éloignement – qu'il ne s'agit pas de décrire comme une volonté organisationnelle explicite mais plutôt comme un phénomène relatif à l'environnement économique de ces entreprises – se caractérise d'au moins deux façons.

Spécialisation des salariés

Un premier éloignement concerne les domaines de connaissances respectifs des salariés, lesquels sont engagés dans un mouvement général « d'hyperspécialisation » (Millgram 2015). Prolongeant la division du travail théorisée par A. Smith ([1776] 2022) à la fin du XVIIIème siècle, l'hyperspécialisation consiste à découper le travail en tâches très spécifiques, libres d'être sous-traitées à des plateformes ou non (Malone, Laubacher, et Johns 2011). Les hyperspécialistes sont experts d'un fragment minime des connaissances de l'organisation[155], ce qui participe d'un isolement au sens où peu d'autres collègues peuvent comprendre les problèmes techniques qu'ils peuvent rencontrer. De la même façon, leur travail se trouve tellement spécifique qu'il perd son lien expérientiel avec la finalité de l'organisation globale. La connaissance générale des procédés, un critère des systèmes complexes relevé par C. Perrow, peut s'en trouver diminuée. L'industrie de la micro-électronique est typique de cette hyperspécialisation qui est notamment liée à ses proximités avec des activités de recherche & développement intenses, portées sur des phénomènes physiques complexes. Les salariés, difficilement interchangeables, construisent leur expérience au fur et à mesure de leur pleine immersion dans l'environnement de travail, laquelle contribue au développement de leur expertise.

Connaissance limitée des processus de travail et de leur finalité

Cette hyperspécialisation s'ébauche dans un environnement où le secret et la confidentialité ont toute leur importance. Un deuxième éloignement se construit alors, cette fois entre les salariés et le fruit de leur travail. Les enquêtés ont une vague idée du secteur dans lequel seront utilisées les puces qu'ils participent à concevoir (automobile, télécommunication) mais ne peuvent cibler de produits précis. Les clients sont d'ailleurs désignés avec des noms de code, qu'il ne faut surtout pas révéler. A moins d'être dans la confidence, les salariés ne savent en réalité pas vraiment ce qu'ils produisent.

La difficulté inhérente à la compréhension des processus de fabrication des matériaux semiconducteurs crée elle aussi une barrière d'intelligibilité. Nous ne sommes pas les seuls à trouver l'entrée dans cet univers difficile : pour les nouveaux salariés, s'habituer constitue également une difficulté. Pour franchir cette marche à l'entrée, qui est d'autant plus imposante en salle blanche où les équipes de nuit subissent

venues du monde du travail et la révélation de scandales sanitaires (liés à la qualité de l'eau, à des malformations chez l'enfant) ont contribué à faire évoluer les pratiques de l'industrie (Lécuyer 2017).

155 B. Lahire (2012) constate et déplore un phénomène similaire à l'œuvre en sociologie, suggérant aux jeunes chercheurs, suivant Jean-Claude Passeron, de « piller la philosophie » pour s'armer conceptuellement.

un turnover important, le travail y est de plus en plus encadré par des procédures en forme d'arbres de décisions. Il s'agit de fiches consultables qui indiquent, pour chaque situation rencontrée dans le travail, les actions à prendre. Or, déplorent les techniciens les plus expérimentés, cette situation conduirait les nouveaux venus à apprendre les procédures de travail (séquentielles), plutôt qu'à apprendre les processus de fabrication industriels qui leur permettraient d'acquérir une flexibilité dans la prise de décision.

La salle blanche

L'essentiel du processus de fabrication qui a été décrit se déroule dans un environnement que nous avons déjà évoqué : la salle blanche (*cleanroom*, « salle propre » en anglais), voir (Figure 26). La salle blanche est un lieu confiné, délimité par un sas, dont de nombreux paramètres sont précisément contrôlés : température, humidité, pression.

Pour débuter son livre dédié aux salles blanches, W. Whyte se montre désarçonnant : « It is clear that a cleanroom is a room that is clean. » (2001:1). Le trait d'esprit fonctionne moins bien en français, W. Whyte suggère en fait que ces salles blanches « propres » sont justement propres par définition. Dans ces espaces, on cherche effectivement à minimiser la présence de particules dans l'air en évitant qu'elles y entrent, qu'elles y soient générées, ou qu'elles y restent (Whyte 2001). C'est à cette fin que d'importants dispositifs d'aération sont mis en place, ils génèrent un bourdonnement permanent assez marquant lorsqu'on pénètre en salle blanche pour la première fois. Dans l'unité que nous avons visitée, le flux est unidirectionnel : l'air part du plafond vers le sol, troué, dont le sous-sol (le *basement*) est également composé d'équipements utiles à l'alimentation ou à la purge des machines – par exemple, pour récupérer les gaz toxiques, peu propres en ce qui les concerne, nécessaires à certaines des phases de gravure. L'aversion pour la moindre particule est aussi la raison pour laquelle il est nécessaire d'être équipé de la tête aux pieds. Rien n'est laissé au hasard : à SemiCorp, des carnets et stylos *spécial salle blanche*, anti-contamination particulaire, sont mis à disposition du personnel. L'industrie du semiconducteur s'est largement dotée de salles blanches, mais elles sont utilisées par d'autres secteurs comme l'optique ou l'industrie pharmaceutique ou agro-alimentaire, où elles permettent d'utiliser des équipements complexes ou de garantir que les espaces soient stériles (Whyte 2001).

Les salles blanches sont en quelque sorte le paroxysme de l'abondance technoscientifique industrielle. On trouve dans celle de SemiCorp de nombreuses machines encombrantes, les unes à côté des autres, en rayons, de sorte à laisser un peu de place à la circulation du personnel. Ces machines opèrent avec une précision remarquable, et sont très chères (jusqu'à des millions d'euros). Il y en a beaucoup : plusieurs dizaines de lots, qui sont des boîtes qui comportent chacun entre une et vingt-cinq plaques, peuvent ainsi être inspectés simultanément. Les machines sont généralement opaques, tout du moins recouvertes par des coques en plastique de sorte à être inaccessibles à la particule virevoltante, à la main négligente, à la lumière extérieure pertubatrice et, conséquemment, à l'œil : on ne voit pas vraiment ce qui s'y passe[156]. Des bureaux surmontés d'ordinateurs sont groupés dans certaines zones pour les équipes de techniciens chargés de la production, de la maintenance, ou de la qualité. Ils sont connectés au réseau et permettent de suivre l'état de la production en temps-réel. Certaines machines sont

[156] Cette opacité est aussi une question de sûreté, puisque des gaz toxiques, des pressions et températures élevés peuvent être confinées dans les machines.

également accessibles et programmables, en local, via des ordinateurs fonctionnant sur des systèmes d'exploitation des années 2000 dont l'archaïsme tranche avec la modernité des systèmes qu'ils pilotent. Et puis il y a ici et là des armoires, des fontaines à eau, des grands écrans[157] dont se servent les équipes en salle pour se réunir et projeter des indicateurs de performance. Le contrôle de l'environnement de la salle blanche (aussi bien en ce qui concerne les paramètres atmosphériques que les lots, suivis à la trace), permet justement de calculer et rendre visibles ces performances à tout instant.



Figure 26 : Une salle blanche (photo récupérée sur le site de l'entreprise STMicroelectronics).

Contrôle de la production, contrôle des salariés

De façon générale, le contrôle est une dimension très importante à SemiCorp. Les processus industriels, les lots, les machines, sont bardées de capteurs. En outre, l'auto-contrôle imposé des corps par l'équipement se prolonge bien en dehors. Sur les marches de l'escalier que j'emprunte à chaque fois que je me rends sur le site, il est écrit : « Ne pas courir », « Ne pas téléphoner », « Tenir la rambarde ». Ces instructions, les salariés ne les lisent probablement plus à force les voir, et elles peuvent être perçues comme infantilisantes. Malgré tout, la personne qui m'accompagne lors de l'une de mes premières visites me conseille de les suivre avec application.

SemiCorp est une entreprise très hiérarchisée[158]. Les communications (messages privés, visio-conférences) se font via un logiciel centralisé. Chaque salarié dispose d'un profil où l'on peut consulter ses supérieurs hiérarchiques (tout autant que les personnes sous sa responsabilité), à la façon d'un arbre

[157] Voir par exemple (Vayre et Igelsböck 2021).

[158] Cela n'empêche pas de remarquer une forme d'autonomie dans la répartition des tâches à l'échelle locale de certaines équipes. Par ailleurs, s'ils sont illustrés par des observations que nous avons pu faire à SemiCorp, les éléments que nous présentons ici ne sont pas propre à l'industrie du semiconducteur.

généalogique hiérarchique. Il est possible de se déplacer de responsable à responsable pour trouver son « N + x » commun. Le profil indique également la disponibilité actuelle du collègue, ce qui permet de vérifier si la personne en question est en réunion, à son poste, absente. La disposition en *open space* (que l'on retrouve aussi en salle blanche où elle se justifie par des contraintes d'espace) est également un moyen de s'assurer de la présence des autres salariés et de pouvoir facilement observer ce qu'ils sont en train de faire. Ces dispositifs favorisent un mode de contrôle plus horizontal (Sewell 1998), qui est additionné à une supervision plus verticale. En salle blanche par exemple, les responsables d'équipe fournissent de façon systématique une appréciation pour chaque analyse de qualité, à la manière d'une note. Chacun est libre de consulter celles qui concernent soi-même aussi bien que ses collègues. Si ces procédés peuvent créer une forme d'anxiété, ils permettent également d'objectiver le travail réalisé, et de fournir des arguments pour montrer la qualité du travail effectué, ou l'augmentation de la charge de travail. La finalité de ces pratiques de contrôle peut être attribuée à la réussite d'objectifs d'optimisation du processus de production.

Le bon fonctionnement de l'usine, déjà très automatisée, repose finalement sur un nombre de salariés de plus en plus restreint dont les erreurs pourraient rapidement devenir coûteuses. Dans le même temps, une grande partie de leur travail consiste déjà, en réalité, à corriger les erreurs des machines (défauts sur les plaques, lot *perdu* car le logiciel a interrompu son suivi). S'agirait-il d'un « reliquat » qui échapperait à l'automatisation, et qui constituerait une sorte de travail incompressible, nécessitant l'intervention d'un savoir ouvrier impossible à automatiser ? G. de Terssac et B. Coriat (1984) s'attaquent à cette thèse et invitent à repenser l'ensemble de l'activité de travail, toute entière modifiée par les processus d'automatisation – même pour les tâches pas concernées par l'automatisation *a priori*. La salle blanche n'en reste pas moins une « fourmilière grouillante » (Blanc-Brude et Defélix 2023), au sens où le travail humain y est toujours aussi nécessaire et bien visible… tant que l'on peut y accéder.

Automatiser pour réduire la complexité ?

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les déploiements de systèmes d'IA que nous décrirons dans cette thèse. L'automatisation vise à y systématiser certaines pratiques, pour les fiabiliser tout en accélérant la cadence et en garantissant une régularité dans les processus industriels. Comme le notent V. Blanc-Brude et C. Defélix (2023), la persistance de l'incertitude peut étonner dans un environnement si automatisé. L'explication tient à l'augmentation de la complexité que génère l'automatisation : « les aléas n'ont en fait pas disparu, mais sont devenus plus nombreux et plus petits du fait de la complexité des processus industriels, impossibles à maitriser dans leur intégralité » (Blanc-Brude et Defélix 2023:55). Ces imprévus demandent une prise de décision éclairée qui s'inscrit dans un travail de délibération collectif. L'automatisation y génère de nouvelles formes de complexité.

Le recours à l'IA s'inscrit dans une histoire plus longue de la numérisation et de l'automatisation de la production en salle blanche (Jaujard, Krohmer, et Oiry 2025). Dès les années 1990, les équipements sont connectés entre eux, les tâches sont ordonnancées automatiquement, et les lots sont affublés d'étiquettes électroniques pour assurer leur suivi. Le chargement des lots et leur transport est aussi robotisé dans les années 2000.

Depuis plusieurs années, par exemple, les salles blanches de SemiCorp se sont dotées d'un réseau de robots de manutention (AMHS) qui sert à transporter chaque lot de plaques d'un endroit à l'autre de l'usine. Il faut imaginer là des sortes de boîtes mouvantes, fixées au plafond, qui suivent un circuit de rails qui leur permettent de circuler d'une machine à l'autre. Elles peuvent monter et descendre verticalement pour venir déposer ou récupérer les lots. Selon les salariés en salle blanche que nous avons rencontrés, le déploiement de cet ensemble de boîtes autoguidées a réduit avec succès les efforts à fournir. Il fallait auparavant pousser les chariots remplis de lots dans les travées de la salle blanche. Mais de leur propre aveu, ce dispositif a aussi accru leur sédentarité, au sens où ils n'ont plus eux-mêmes à circuler dans les allées en faisant rouler leurs chariots. Or, ces déplacements quotidiens n'avaient pas qu'une valeur logistique : les salariés en profitaient pour discuter avec leurs collègues de façon informelle, et pouvaient également transmettre en face-à-face des informations qui aujourd'hui transitent par mail, de façon plus laborieuse. Si cette automatisation dénote d'une stratégie générale de réduction de l'incertitude, elle résout bien certains problèmes tout en en créant d'autres. Elle produit en plus de nouvelles interdépendances liées à la conception externalisée (dans les bureaux, voire sous-traitée à l'extérieur) de systèmes utilisés en salle blanche.

Contributions attendues de l'IA et de l'Industrie 4.0 à l'industrie du semiconducteur

Parmi les réponses que pourraient apporter les technologies de l'*Industrie 4.0* aux problèmes de l'industrie de la micro-électronique figure justement celle de la robustesse face à la variabilité (Dequeant et al. 2016). Nous l'avons montré, la fabrication des dispositifs à semiconducteurs est un processus long, avec de nombreuses étapes, elles-mêmes complexes, impliquant de nombreuses machines différentes. Tous ces éléments sont des facteurs de variabilité, définis comme des causes de perte d'efficacité du processus de production par la génération de temps non-productifs (Dequeant et al. 2016). Par une meilleure analyse en temps-réel permise par l'implantation de capteurs, le traitement puis l'analyse des données produites, des problèmes pourraient être diagnostiqués plus vite, de sorte à fluidifier la production. D'autres aspects de l'activité productive pourraient être concernés, par exemple l'affectation des tâches, de façon dynamique et réactive, des salariés en salle blanche (Waschneck et al. 2016). Les usines tournent en continu toute la journée, ce qui demande une adaptation en temps-réel qui puisse prendre en compte les défaillances qui pourraient surgir. Sous un autre angle, les innovations en matière de maintenance prédictive cherchent elles aussi à optimiser le planning des techniciens de maintenance en les faisant intervenir sur les machines (de gravure, de dépôt) en amont de la défaillance (Fischer, Moder, et Ehm 2021). C'est justement le projet sur lequel planchent les équipes de Mecanex, qui fournissent des équipements à SemiCorp et que nous évoquerons à la fin de ce chapitre. De façon générale, c'est la question de la temporalité de la réalisation des tâches qui est centrale au sein d'un secteur où règne une forte incertitude. L'*Industrie 4.0* offre un cadre conceptuel pour la poursuite de l'optimisation du temps de travail et de sa segmentation tandis que l'IA en est une composante technologique.

1.c. Le travail de la qualité dans l'industrie du semiconducteur : une chaîne d'analyse

Concluons notre plongée dans l'univers de l'industrie de la micro-électronique en détaillant le périmètre dans lequel s'est inscrit notre étude, à savoir celui du travail de la qualité.

Contexte de recueil des représentations

Nous avons passé plus d'un an en immersion ponctuelle dans une entreprise du semiconducteur, SemiCorp, au sein d'une équipe chargé du déploiement de systèmes d'IA (que nous appelons « équipe IA »). Nous avons pu récolter, lors de discussions au poste de travail, mais aussi d'échanges plus informels, les points de vue d'ingénieurs, techniciens, et managers. Les réunions que nous avons suivies ont également été l'occasion de débats, de confrontation d'idées et d'explicitation de la position des salariés. Soulignons enfin que l'équipe suivie à SemiCorp avait déjà participé à la conception et au déploiement d'un système d'IA, le CatégoDéfo, et avait ainsi éprouvé un processus complexe d'implémentation d'une technologie nouvelle. Pour visualiser schématiquement les acteurs rencontrés et le positionnement de leurs équipes respectives, nous renvoyons à la Figure 27.

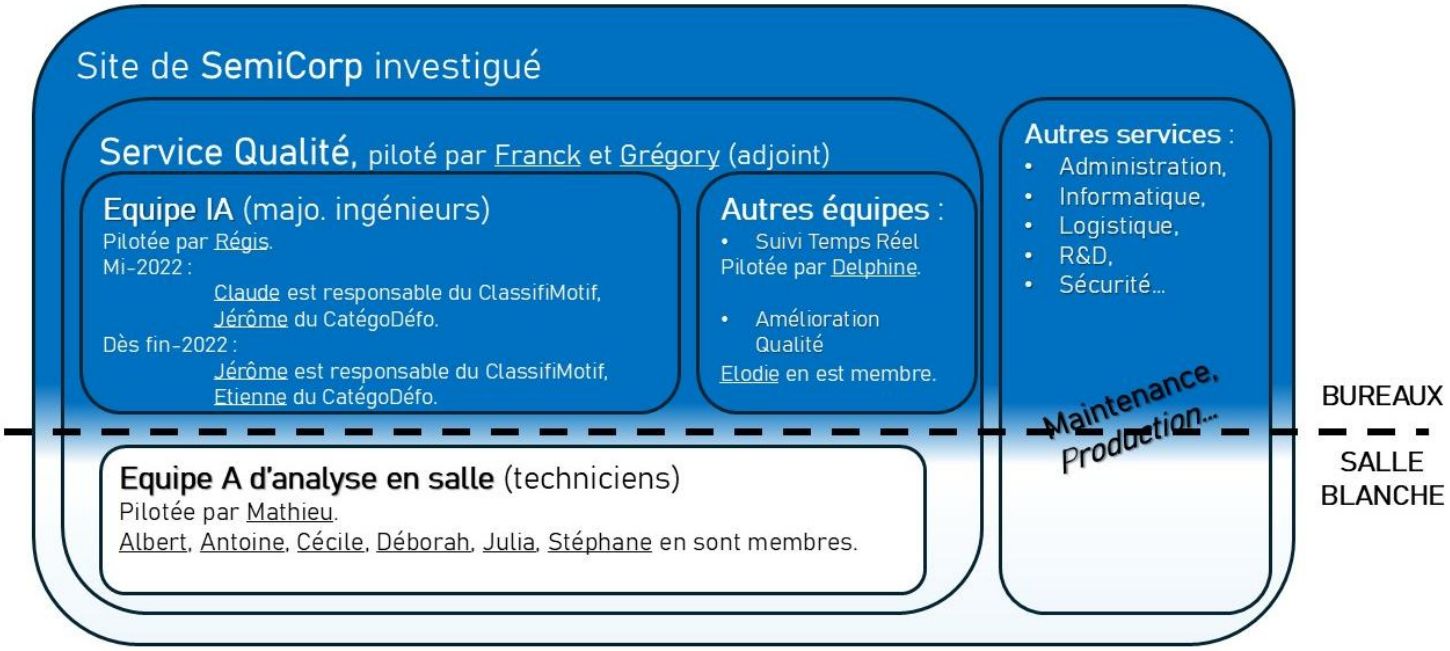


Figure 27 : Positionnement spatial et organisationnel des équipes côtoyées dans le cadre de l'étude. Les prénoms ont été modifiés, et font référence à des enquêtés mentionnés au fil du texte.

L'équipe IA est formellement située dans un service important du site étudié, celui du contrôle qualité (que nous appellerons « service Qualité »). Ce service est divisé entre des ingénieurs, localisés dans des bureaux en *open space*, et des techniciens, qui travaillent en salle blanche. Les ingénieurs de ce service (au nombre d'une trentaine environ) travaillent à améliorer la qualité de la production. Leur but premier est de repérer et d'agir au plus vite sur des alertes qui pourraient compromettre la production. Pour ce faire, ils opèrent sur différents niveaux de temporalité vis-à-vis du flux de production. Certains sont chargés de traiter les problèmes détectés en temps réel, et en collaboration rapprochée avec les

équipes en salle blanche. C'est le cas de l'équipe Suivi Temps Réel, dirigée par Delphine. D'autres (comme l'équipe IA) s'attellent à des projets innovants découplés de la production. La majorité des ingénieurs de ce service se rendent relativement rarement en salle blanche et opèrent à distance, sur ordinateur. Les techniciens, quant à eux, travaillent directement en salle blanche. De plus, comme le service Qualité tourne en continu, nuit comprise, plusieurs équipes se relaient sur des prises de poste de huit heures (en trois-huit).

Une stratégie qualité à l'échelle de l'organisation

Les investissements de SemiCorp dans le développement de systèmes pointus pour le contrôle qualité montre son implication dans une approche par la « qualité totale » (Mispelblom 1995), au sens d'une conformité absolue à la commande des entreprises clientes (Segrestin 2004:164). Originellement, les démarches qualité se fondaient sur des contrôles aux extrémités du flux productif : en amont pour vérifier la conformité des matières premières acheminées par les fournisseurs, et en aval afin de s'assurer que la fabrication s'était déroulée comme prévu (Segrestin 2004:164). La démarche de « qualité totale », diffusée dans la seconde moitié du XXème siècle, change la donne. Conçue au sein de l'industrie automobile japonaise, elle vise à tourner l'entreprise toute entière vers la qualité, à laquelle le management serait subordonné (Mispelblom 1995:194). Pour garantir la réduction des défaillances, les promoteurs de la qualité totale estiment qu'il serait judicieux d'examiner l'ensemble des maillons de la chaîne de production, et non plus seulement ses bouts (Segrestin 2004:165). Une telle démarche permettrait d'analyser les défaillances du flux productif en continu afin de les résoudre.

A SemiCorp, une stratégie qualité en interne est déployée par la direction. Des rapports annuels sont produits en engageant chacun des salariés à une responsabilité dans la réalisation de leur travail. A terme, l'objectif est celui du zéro défaut : les rebuts seraient réduits, voire supprimés. La mise en œuvre d'une telle démarche se révèle complexe dans l'industrie du semiconducteur où les échelles de gravure et de dépôt des métaux, micro- voire nanométriques, induisent une incertitude inhérente aux procédés de fabrication. Le contrôle qualité prend une part importante de l'organisation de la production, dont il est inextricable, puisque chaque plaque effectue de nombreux passages par le service Qualité. Le recours à l'IA s'inscrit pleinement dans cette recherche d'une optimisation de la production.

La chaîne d'analyse qualité

Le travail d'analyse peut se concevoir comme une chaîne, divisée en trois segments séquentiels : l'imagerie, l'analyse et la résolution, voir (Figure 28). Nous décrivons ici ces étapes dans les grandes lignes ; dans les chapitres ultérieurs, nous aurons l'occasion d'aller plus en détail de certaines d'entre elles. Cette description nous permettra de mieux comprendre par la suite les enjeux des promesses de l'automatisation soulevés par les différents enquêtés.

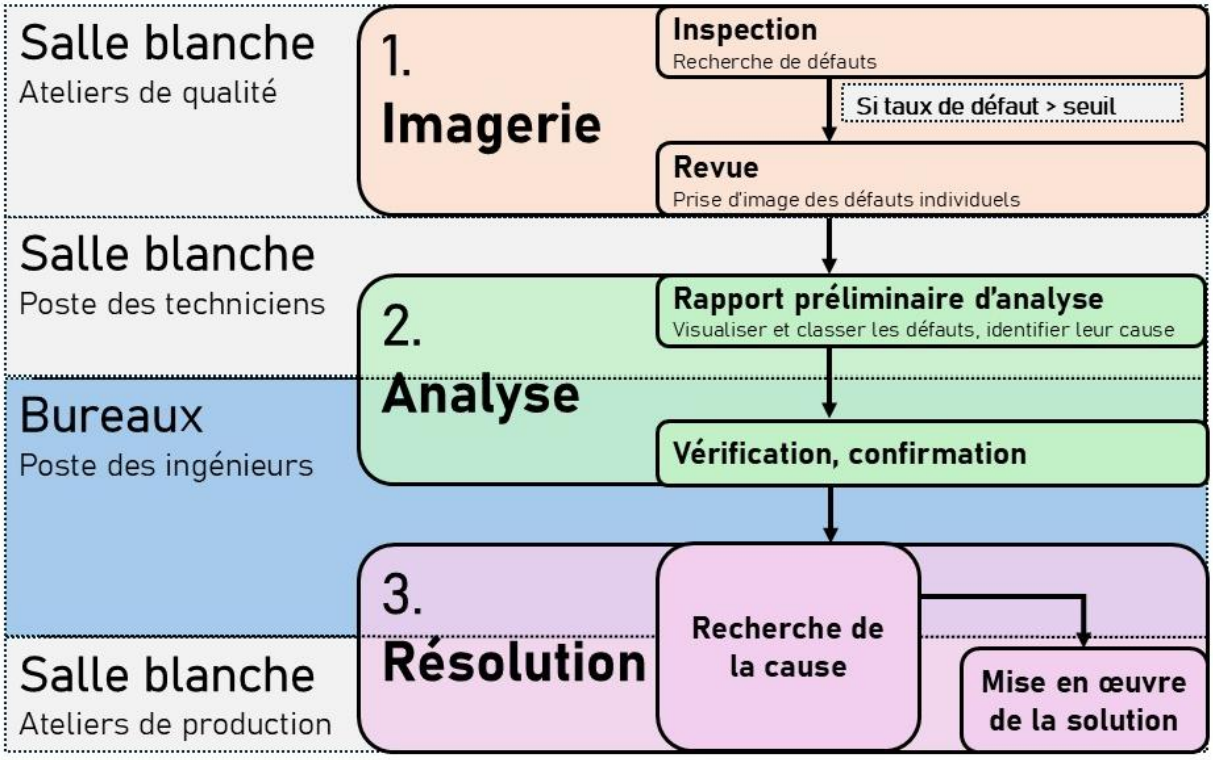


Figure 28 : Schématisation de la chaîne d'analyse qualité.

Prise d'images, alertes potentielles

La première étape se déroule en salle blanche, au sein de l'atelier qualité. A intervalles réguliers lors de leur fabrication (qui peut durer plusieurs semaines), de façon systématique, les lots y sont acheminés grâce au système de circulation automatisé. Cette automatisation, partielle en réalité, s'opère sous la supervision d'un technicien qualité, le « ligneur ». Lors de leur passage dans l'atelier qualité, un échantillon des plaques présentes dans le lot est ensuite soumis à différents capteurs d'imagerie. La prise d'images se fait en deux temps : (1) l'inspection, qui permet de détecter les défauts, et (2) la revue, optionnelle, qui permet d'observer les défauts un à un dans le cas où l'inspection révèlerait une situation potentiellement problématique.

L'inspection consiste d'abord à prendre une image de la plaque grâce à des capteurs optiques. Cette image est mise en parallèle avec une image de plaque standard, qui représente ce qui est attendu d'une plaque vierge de défauts. Ces deux images sont comparées grâce à un algorithme de traitement d'image qui permet de pointer les zones différentes entre la plaque de référence et la plaque inspectée. La comparaison permet de mettre au jour un ensemble de défauts, et une cartographie dédiée est produite suite à l'inspection, voir (Figure 29). Si jamais l'inspection ne renvoie que peu ou pas de défauts, la plaque est réinjectée dans le circuit de fabrication, car seule une quantité minime de puces sont endommagées. Il s'agit d'un point important à souligner : la présence de défauts ne constitue pas un problème en soi, sauf si leur quantité est trop importante.

Dans le cas où une plaque serait considérée comme suspicieuse, on procède à une deuxième salve de prise d'images : la revue. Des appareils de mesure plus précis (mais aussi plus lents) comme des

microscopes électroniques à balayage, sont utilisés à cette fin. Ils capturent les zones susceptibles de comporter des défauts, repérées lors de l'inspection, voir (Figure 30) qui répertorie différents types de défauts présentés dans une étude du champ (Graur et al. 2015). L'enclenchement de cette phase de revue génère une alerte, et un traitement humain : la revue des défauts précède nécessairement une analyse qualité.

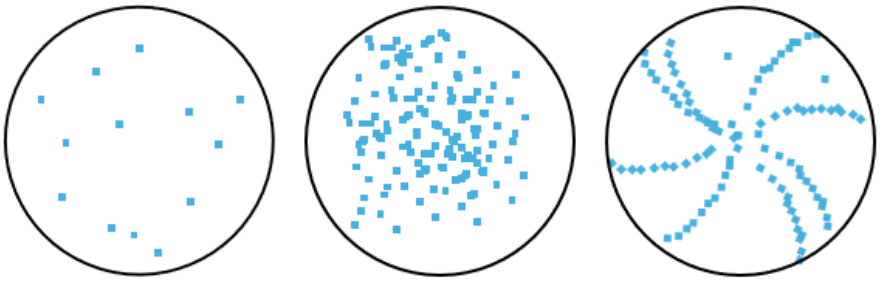


Figure 29 : Exemple d'images obtenues en sortie d'inspection. Chaque carré bleu correspond à un défaut. La présence de quelques défauts ponctuels (à gauche) ne constitue pas nécessairement un problème. Lorsqu'ils sont nombreux (au centre) ou regroupés selon des motifs particuliers (à droite), une investigation supplémentaire devient impérative.

De façon générale, le contrôle qualité dans l'industrie du semiconducteur dépend fortement d'une médiation par l'image. Tout au long de mon séjour au sein de l'équipe IA, et alors même que j'ai passé plusieurs jours en salle blanche, je n'ai vu aucune plaque de mes propres yeux (hormis quelques-unes encadrées dans les couloirs).

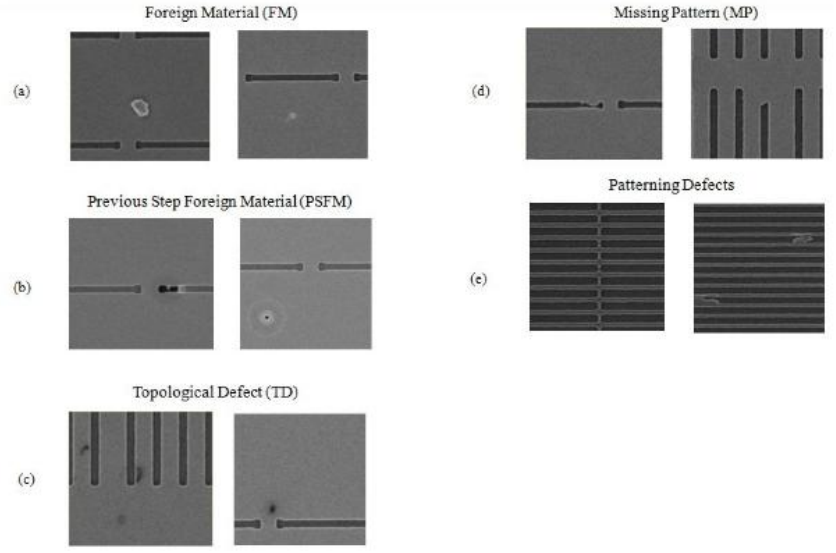


Figure 1. Classes of defects considered: (a) – patterning related defects (bridging, "flop over"); (b) – missing pattern; (c) – foreign material; (d) – non-topological defect; (e) – foreign material from previous processing step

Figure 30 : Une taxonomie de défauts, tirée de (Graur et al., 2015)., repérables grâce à une revue. Les images sont obtenues grâce à des microscopes électroniques à balayage. On peut imaginer que chacun d'eux puisse représenter un carré bleu sur une image d'inspection.

Analyse des images, recherches des causes

Une seconde étape, l'analyse, cherche à scruter ces images pour comprendre quelle est la nature des défauts présents sur la plaque et diagnostiquer le problème. L'analyse est menée en deux temps : d'abord en salle blanche, les techniciens classent l'ensemble des défauts présents sur la plaque. Ils produisent un graphique qui rend compte de la proportion de chacun des types de défaut, de sorte à voir lesquels

sont majoritaires. Leur but est de déterminer à quelle étape de fabrication ils ont pu apparaître. Ils rédigent un rapport d'analyse qui est ensuite transmis dans les bureaux à des ingénieurs qui confirment ou pas le diagnostic. Il arrive que des doutes subsistent sur l'origine du problème, les ateliers de production potentiellement incriminés sont en général contactés afin de vérifier si l'une de leurs machines ne pose pas problème. L'analyse cherche aussi à évaluer l'étendue des dégâts sur les plaques défectueuses. Les plus amochées peuvent être mises au rebut (elles sont «*scrapées* ») tandis que certaines peuvent faire l'objet d'un traitement intermédiaire. Les techniciens qualité les plus expérimentés sont habilités à réaliser des ancrages, c'est-à-dire à tracer (sur logiciel) des zones de découpe qui seront réalisées en toute fin de fabrication. Le lot peut ainsi continuer son trajet de façon normale, et passe simplement par une étape supplémentaire en fin de fabrication où la partie abimée de la plaque est retirée.

Résolution du problème

Une fois le problème formellement identifié par les ingénieurs des bureaux et les ateliers de production, des interventions sont planifiées pour régler le problème. Toute la démarche d'analyse qualité est effectuée dans une certaine urgence car la détection de défauts peut indiquer qu'une machine est elle-même défectueuse (par exemple, un instrument est mal positionné et raye les plaques). Dans ce cas, chaque minute qui passe peut occasionner l'altération de nouvelles plaques qui transiteraient elles aussi par ces machines, et donc générer des frais financiers importants.

Le contrôle qualité comme travail d'enquête

Le travail du service Qualité s'inscrit dans un univers technicisé et rationalisé. On y retrouve les exigences de traçabilité des événements et des actions déjà identifiées dans l'industrie automobile (Rot 1998). L'état des machines est suivi numériquement grâce à des capteurs, de même que les lots, dont la trajectoire de fabrication constituée de dizaines voire de centaines d'étapes est consultable à tout moment. Cet appareillage technologique massif restreint la possibilité de mener des interventions informelles telles que les a décrites G. Rot (1998). En outre, les rapports d'analyse des techniciens sont aussi numérisés, de sorte qu'ils transitent et sont amendés au fil de leur circulation entre la salle blanche et les bureaux.

En vérité, le contrôle qualité est un véritable travail d'investigation, une « activité d'enquête » (Thievenaz 2014)[159]. La victime est le plus souvent l'entreprise : chaque incident est un frein au flux de production dont il s'agit d'assurer la continuité. Il y a les cas évidents, qui sont rencontrés régulièrement, ou les cas litigieux qui mènent parfois à des enquêtes au long cours. Les rôles sont distribués de sorte que les techniciens récoltent les preuves et fournissent une première analyse, laquelle est ensuite validée par les ingénieurs des bureaux, qui poursuivent l'investigation de leur côté. Quant aux coupables, ils ne sont pas toujours bien définis : ce sont parfois des machines (à réparer), des aléas vaporeux (circulation malencontreuse de particules microscopiques dans l'air). De nos observations relativement partielles de la phase de recherche de causes des dysfonctionnements, opérée depuis les bureaux, nous retenons

[159] J. Thievenaz reprend la notion d'enquête à partir des travaux pragmatistes de John Dewey, qui la définit comme une « transformation contrôlée ou dirigée d'une situation indéterminée en une situation qui est si déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu'elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié » (Dewey [1938] 2006), cité par (Thievenaz 2014). Nous entendons ici l'enquête comme une activité collective et non pas seulement comme un processus réflexif individuel.

que la recherche d'une responsabilité ne vise pas tant à blâmer des salariés fautifs qu'à améliorer le processus de fabrication, ainsi que l'a noté N. Dodier (1995), pour minimiser les pertes.

La production est assurée de jour comme de nuit et le travail d'enquête est lui aussi continu. Jérôme, ingénieur Qualité, me dit un matin que travailler au service Qualité de SemiCorp, c'est « vider une baignoire avec le robinet ouvert[160] ». Les résolutions des problèmes qualité sont suivies d'apparitions de nouveaux problèmes à résoudre. En trois-huit, le boulot ne s'arrête jamais : techniciens et ingénieurs qualité sont, d'une certaine façon, les anti-Danaïdes[161] modernes.

[160] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en février 2023.

[161] Dans la mythologie grecque, les Danaïdes sont des sœurs, filles du roi Danaos, envoyées aux Enfers après avoir tué leurs cousins à qui elles allaient être mariées de force. Elles reçoivent le châtiment éternel de devoir remplir d'eau une jarre trouée, laquelle se vide inlassablement.

Conclusion (I.1)

Ce segment relativement descriptif de la thèse a cherché à présenter l'industrie de la micro-électronique sous plusieurs angles : celui, technique, des produits qu'elle fabrique ; celui, organisationnel, des processus de fabrication ; et celui, enfin, du travail de la qualité, qui vise à assurer la continuité et le bon déroulement de ces processus. L'analyse des efforts mis en œuvre pour assurer la bonne qualité de la production doit convaincre de l'importance du travail humain dans un environnement techniquement complexe, déjà fortement automatisé. Une industrie très à la pointe sur le plan technologique reste dépendante de la compétence de ses salariés.

La production de semiconducteurs est ainsi un système complexe au sens de C. Perrow (2011). Elle fait concourir de nombreux flux de production parallèles au sein d'un environnement compact, la salle blanche, tout en externalisant une partie du travail, mis à distance spatialement (dans les bureaux) ou techniquement (par le recours à la médiation technologique). Cet éloignement par rapport au lieu de l'action participe de l'instauration d'une forme « travail médiatisé distant », tout à la fois délocalisé, dématérialisé et distribué (Stéphan, Bobillier-Chaumon, et Gaudart 2022). Il a pourtant cela d'original qu'il est distant tout en produisant sur le lieu de travail. Quand la finalité du travail s'éloigne, ce sont les salariés qui peuvent perdre en intérêt pour leur emploi. L'enjeu n'est pas négligeable pour l'industrie du semiconducteur. Des conversations avec l'un de nos contacts principaux à SemiCorp nous a appris que le départ de salariés ne trouvant pas ou plus de sens à leur travail était un phénomène d'ampleur, et ce même pour des postes à responsabilité et hautement qualifiés.

Ce préambule nous a permis de dresser une partie du cadre technique et organisationnel de l'industrie du semiconducteur après avoir abordé ses enjeux économiques dans le chapitre précédent. Nous nous proposons d'examiner désormais, la façon dont les promesses y sont traitées dans le cadre du déploiement de systèmes d'IA.

2. Concilier les promesses : la cohabitation des discours dans le travail de la qualité du semiconducteur

Où sont les promesses dans l'industrie du semiconducteur ? Jusqu'ici, nous avons interrogé les promesses liées à l'IA dans l'industrie d'un point de vue surplombant, en évoquant leur teneur générale, leur construction culturelle, et en les considérant de façon désincarnée, comme si elles existaient par elles-mêmes. Bien que nous ayons tâché de montrer qu'elles véhiculaient en leur sein un certain nombre d'enjeux économiques, nous avons pour l'instant échoué à leur donner une existence propre : sont-elles reprises, prononcées telles quelles ? Sont-elles l'objet d'une réappropriation, d'interprétations ? Comme le rappelle M. Foucault ([1969] 2008)[162], le discours ne peut pas être que la version figée d'une idée préconçue devenue orale, ou écrite. C'est au travers de la construction du discours, dans la communication, que s'organise une vision du monde particulière. Dans l'objectif d'une analyse approfondie des promesses de l'IA dans l'industrie, nous nous proposons ainsi de nous intéresser désormais à leur prégnance au sein du milieu industriel et à la façon dont elle se concrétisent ou non en « attentes » (Borup et al. 2006). En changeant d'échelle, nous souhaitons voir l'intensité de la « propagation » des promesses (Boullier 2023). Dans quelle mesure les visions de l'IA des salariés de l'industrie sont-elles empreintes des promesses à son sujet ? Pour ce faire, nous souhaitons désormais examiner la « perception » de l'IA (Leonardi et Barley 2010) au sein de l'industrie du semiconducteur elle-même. C'est à cette occasion que nous pourrons aborder des premiers éléments empiriques récoltés dans une étude de terrain effectuée sur le long-terme (entre 2022 et 2023) dans l'entreprise SemiCorp.

Une double promesse sur l'automatisation dans la qualité

Alice, stagiaire ingénieure, vient tout juste d'arriver dans le service Qualité pour un stage de quelques mois. C'est la première fois que je la rencontre. Elle est à son bureau dans l'*open space*, je me présente à elle et, après m'être assuré que je ne la dérangeais pas, je lui demande ce sur quoi elle travaille. Elle me dit plancher sur une nouvelle version d'un système d'IA déjà utilisé par le service, le CatégoDéfo, qui sert à classer automatiquement les défauts sur la base des images de revue. Alors que je lui demande sur quoi porte son projet (dont je suis plus ou moins familier), sa réponse me surprend puisqu'elle évoque d'emblée le besoin de pallier les déficiences potentielles de l'utilisateur : « Il ne peut pas tout voir. […] L'opérateur s'il vient de prendre sa pause il peut manquer des trucs[163]. » Plus que le contenu-même de la réponse, et la promptitude avec laquelle celle-ci est venue sur le plan de la comparaison humain-machine, ce qui me frappe alors, c'est que j'ai un sentiment de *déjà écouté*. En fait, j'ai déjà entendu ça durant mon enquête à plusieurs reprises de la part de Régis, responsable de l'équipe IA, c'est un leitmotiv récurrent chez lui. Cette anecdote ne dit pas grand-chose après tout. Alice partage peut-être simplement les opinions de Régis, avec qui elle venait justement d'avoir une conversation avant que nous ne discutions. Ce que révèle simplement cette situation, prise isolément, c'est que certaines des représentations de l'IA sont partagées concernant le gain de performance que pourrait permettre d'obtenir

[162] « Le discours est tout autre chose que le lieu où viennent se déposer et se superposer, comme en une simple surface d'inscription, des objets qui auraient été instaurés à l'avance. » (Foucault [1969] 2008:62).

[163] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juin 2023.

de tels systèmes. Régis participe à faire circuler la promesse de l'efficience technique au travers de la comparaison humain-machine. Elle motive, côté ingénieurs, le travail de raffinement des systèmes de l'équipe IA.

Mais en réalité, Régis – et plus généralement les managers des bureaux[164] – ne tiennent pas tout à fait le même discours auprès des techniciens. C'est au cours des réunions où sont présentés les systèmes d'IA que j'ai pu l'observer. Ces réunions, qui ont lieu sur un rythme trimestriel, réunissent tous ensemble personnels des bureaux et de la salle blanche. Occasions rares de confrontation des ingénieurs aux techniciens, elles sont une mine d'or pour investiguer le processus de justification du déploiement technologique en salle blanche. Elles cristallisent le passage des systèmes d'IA conçus dans les bureaux vers la salle blanche. Les ingénieurs y sont par exemple amenés à expliquer aux techniciens, PowerPoint à l'appui, le fonctionnement général des nouveaux systèmes d'IA qu'ils conçoivent. Lors de l'une d'elles, Régis insiste sur la nécessité de poursuivre les efforts d'automatisation pour augmenter le « confort de travail ». Le nouveau système d'IA en projet, quant à lui, pourra « faciliter le travail d'analyse et de prise de décision[165] ». La promesse à laquelle il recourt ici est celle de l'amélioration du travail via la délégation de tâches pénibles. La démarche est semble-t-il sincère, puisque l'objet de cette réunion est également de sonder les besoins des techniciens en termes d'automatisation de tâches, dans le but d'amorcer de nouveaux projets (même de faible envergure) afin de répondre à leurs attentes[166]. Elle s'inscrit malgré tout dans un mouvement de recherche de participation croissante des salariés à la rationalisation, qui vise aussi à limiter leur critique à l'organisation du travail (Rot 2000).

Un conflit de rationalité

Les deux situations que nous venons de présenter, bouts de phrases à peine contextualisés, ne peuvent résumer la position tenue par Régis. Nous ne cherchons pas à mettre en avant un paradoxe ou une contradiction, parce qu'en réalité, ces prises de position ne se contredisent pas. Elles illustrent non pas des réalités différentes, mais des registres différents qui cherchent à combler des attentes différentes. D'un côté, on promeut l'efficience du travail, de l'autre son épanouissement. Les promesses véhiculées par le discours orthodoxe sont mobilisées de façon sélective selon le public à convaincre.

Ce jeu d'équilibriste est caractéristique d'un « conflit de rationalité » (Borel, Condé, et Ferguson 2024a). La première sous-section cherchera à expliciter cette notion et à l'illustrer dans le cadre de SemiCorp, en montrant dans quel type de promesses les différents acteurs portent leur crédence (2.a). La sous-section suivante montrera comment le management de l'équipe IA, déploie une stratégie rhétorique d'acceptabilité du système d'IA pour tenter de trouver une solution au compromis de rationalité. C'est

[164] Par contraste avec les managers en salle blanche qui gèrent les équipes de techniciens qualité.

[165] Propos recueillis lors d'une réunion en septembre 2022.

[166] Paradoxalement, les demandes des techniciens concernent des aspects précis (par exemple : ne pas devoir entrer ses identifiants personnels de façon systématique sur les machines) qui paraissent nécessiter des solutions relativement simples sur le plan technique (quelques lignes de code pour les plus complexes). Elles peuvent malgré tout être complexes à implémenter sur le plan organisationnel étant donné la distribution segmentée du travail à SemiCorp. L'équipe IA dépend par exemple d'autres services internes pour implémenter le moindre modèle d'IA ou sa mise à jour.

notamment, nous le verrons, au travers de la mobilisation ambiguë de la notion de « valeur ajoutée » que peuvent être fusionnées deux facettes divergentes des promesses de l'IA (2.b).

2.a. Le sujet de l'IA comme cristallisation d'un conflit de rationalité

Rationalité gestionnaire

Chez SemiCorp, le déploiement progressif des technologies d'IA que nous avons pu observer se déroule dans le contexte particulier d'un plan d'augmentation massive de la production (que les managers appellent le « *ramp-up* »). 2022 et 2023 sont des années particulièrement florissantes pour l'entreprise, dont le chiffre d'affaires se compte en milliards d'euros.

L'enjeu de l'introduction de l'IA dans le service Qualité est celui d'une automatisation de certaines tâches, de sorte que la quantité de travail à fournir n'augmente pas autant que la quantité de production. C'est ce que révèle Franck, le directeur du service Qualité lors d'une réunion quasi-hebdomadaire[167] auprès de l'ensemble des ingénieurs du service[168]. Il y explique que l'entreprise est en très bonne santé financière et doit prolonger son effort dans deux chantiers : ceux de la numérisation de la production et de l'amélioration de la gestion de l'énergie et de l'eau[169]. C'est son interprétation, il le dit explicitement, du « *More than Moore* » : les performances pures des produits ne sont plus les seuls axes prioritaires d'amélioration. En particulier, le besoin de « digitaliser » les outils, indique-t-il, est lié au fait que le recrutement ne suit pas l'augmentation de la production. Les mots d'ordre majeurs, assène-t-il à l'occasion de cette réunion, sont « *Growth, growth, growth*[170] ». Ils sont accompagnés d'autres défis, qu'il relie directement au besoin de croissance : industrialisation massive de nouvelles technologies, recrutement, productivité.

Ce point de vue est celui d'une rationalité gestionnaire. La technologie est perçue comme devant pleinement être mise au service de la productivité de l'entreprise. A aucun moment, lors de cette réunion, l'intérêt des nouvelles technologies pour l'amélioration du travail n'est mentionné. Ce n'est pas forcément parce qu'elle est sans importance, ce n'est simplement pas le sujet. La digitalisation sert, dans ce discours, à soutenir économiquement SemiCorp. C'est la promesse économique d'une augmentation de la production, susceptible d'être soutenue à main d'œuvre égale, qui circule ici.

L'un des systèmes développés par l'équipe IA par exemple, le ClassifiMotif, scanne l'ensemble des plaques de la production à la recherche de motifs de défauts (en ligne, en cercle), qui pourraient être révélateur de problèmes en amont dans la production. Dans la chaîne d'analyse (Figure 28), la condition pour passer de l'inspection à la revue n'est plus seulement liée à la quantité surfacique de défauts, mais également à la présence de ces motifs, voir (Figure 31). Le ClassifiMotif s'insère dans une volonté de gain en temps de traitement et en traçabilité. En pratique, ils sont supposés réduire le temps nécessaire à produire une analyse de défaut, et donc leur permettre de réaliser plus d'analyses à l'heure. L'objectif est également de gagner en précision dans les analyses. Car l'un des intérêts de son déploiement, c'est de dépasser l'erreur considérée comme inhérente à des techniciens humains, donc faillibles. Régis dit

[167] Ces « *weekly* » ne se tiennent en réalité pas toutes les semaines, mais ont conservé ce nom.

[168] Propos recueillis lors d'une réunion en décembre 2022.

[169] L'industrie du semiconducteur fait localement l'objet d'une importante contestation structurée autour d'une critique de sa consommation d'eau. SemiCorp, de son côté, a fait des efforts pour diminuer sa consommation par unité produite. C'est ce qu'explique Franck, le directeur du service, lors de la réunion, même si, comme il le précise lui-même, l'augmentation de la production continue à faire mécaniquement grimper la consommation totale.

[170] « Croissance, croissance, croissance », en anglais.

par exemple un jour : « Le ClassifiMotif, il est stable. Alors que l'opérateur, si c'est le matin, le midi, ou le soir, il va pas donner le même résultat à chaque fois. C'est cette stabilité qu'on recherche[171]. » La question de l'objectivité technique ressurgit ici comme un motif à part entière du déploiement du système d'IA. Notre analyse doit porter au-delà de la simple constatation d'une rivalité humain-machine dans l'environnement industriel. Ce qui intéresse la rationalité gestionnaire, c'est également (et peut-être avant tout) la « stabilité » comme aime à le répéter Régis, que l'on peut comprendre comme une diminution de la variance de la qualité des flux industriels. Le nouveau système est conçu pour être efficace, mais aussi pour être prévisible, c'est-à-dire pour réduire l'incertitude. Peu importe s'il fait des erreurs, tant que celles-ci sont faciles à reconnaître, voire si elles peuvent être anticipées (par exemple si le système est mis à l'amende dans des cas spécifiques, bien connus, donc anticipables). Cette stabilité est une finalité attendue du système d'IA pour la réduction de l'aléa dans un contexte de forte incertitude organisationnelle. Poussée à son terme, la logique entrevoit la disparition totale de l'activité d'analyse. Ainsi que le suggère Grégory, responsable adjoint du service Qualité lors d'une réunion avec des managers et ingénieurs à propos des projets d'automatisation en cours : « Aujourd'hui la vision c'est que c'est l'opérateur qui vérifie ce que fait le CatégoDéfo. A terme, y aura plus rien[172]. »

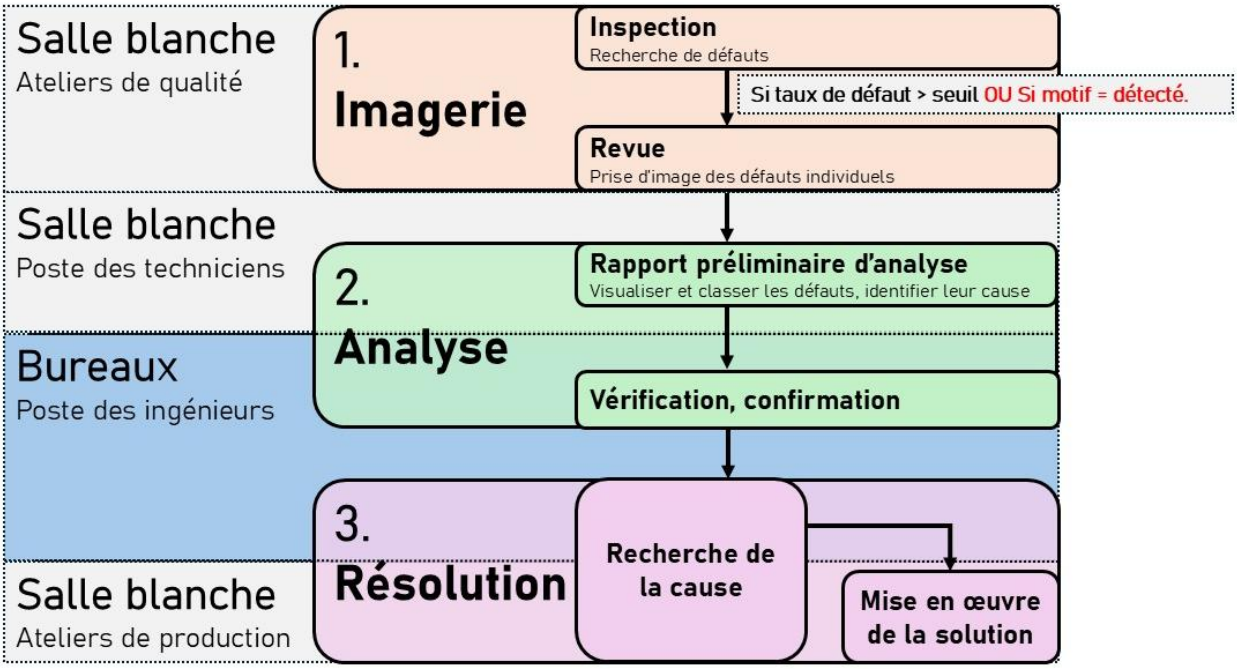


Figure 31 : Schématisation de la chaîne d'analyse qualité après introduction du ClassifiMotif (modification en rouge par rapport à la schématisation précédente).

Travail réel

Ce n'est pas tout à fait par ce prisme que l'IA est envisagée du point de vue de ses futurs adoptants. J'ai pu assister à plusieurs réunions où le ClassifiMotif était présenté à des techniciens qualité et un constat m'a frappé : le fait qu'il s'agisse d'IA ne suscite pas de réaction particulière, ni même qu'il s'agisse d'un système automatisé.

[171] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2022.

[172] Propos recueillis lors d'une réunion en mars 2023.

Difficile de tirer un point de vue concluant sur l'opinion des techniciens sur cette seule base. Après tout, ils sont habitués de ces réunions verticales lors desquelles des nouveautés techniques dont ils devront se saisir leur sont présentées[173]. Les techniciens soulèvent malgré tout de nombreuses interrogations. Ils se questionnent par exemple sur l'intégration de ce nouveau logiciel à l'interface existante ou sur la possibilité de le faire fonctionner en local[174]. Mais en vérité, le sujet du ClassifiMotif est vite évacué pour aborder d'autres thèmes jugés plus pressants : une machine, par exemple, ne dispose pas de chaise attitrée. Il faut travailler sur l'ordinateur, posé sur une table, en restant debout. Par ailleurs, il n'y a toujours pas d'organigramme, les techniciens ne savent pas toujours vers qui se tourner. Un technicien soulève aussi le problème de plaques qui repassent en continu à cause de bugs du système automatique, ce qui force à réitérer le travail sur des lots déjà traités et génère un certain agacement. Des ingénieurs lui indiquent des personnes avec qui prendre contact.

Ces doléances caractérisent une rationalité du travail réel, c'est-à-dire celui qui est effectué dans la vie de tous les jours. Les techniciens du service Qualité sont déjà aux prises d'un environnement de travail très technicisé qui, comme cette réunion permet de le constater, n'est pas sans aspérités. Le travail peut être inconfortable et stressant lorsque le service Qualité se trouve submergé de lots à traiter. La majorité des communications entre bureaux et salle blanche se font par mail, rarement au téléphone : beaucoup de collègues ne se connaissent pas. En bref, les techniciens du service Qualité sont habitués au numérique, sous toutes ses facettes, c'est-à-dire aussi bien pour la gestion de la production, la communication, que le travail coopératif (Boboc 2017).

Nous avons peu eu l'occasion de discuter de perception de l'IA avec les techniciens en salle blanche[175]. Ce qui ressort, de façon générale, c'est que les systèmes d'IA y sont traités comme n'importe quel logiciel, et ne sont jamais appelés « IA », ni même algorithmes d'ailleurs, mais sont désignés par leur nom (CatégoDéfo ou ClassifiMotif, par exemple). Ce constat rejoint parfaitement les observations faites par J. Condé et Y. Ferguson : « [Les IA] deviennent des outils particuliers, dilués au sein de l'outillage complet du professionnel. Elles sont ainsi réduites à leurs fonctions et à leurs tâches spécifiques, lesquelles ne représentent qu'une fraction de l'ensemble du travail. » (2023:29). Comme tous les logiciels, les systèmes d'IA sont parfois loués pour leur rapidité et leur efficacité, parfois dénigrés pour leurs bugs et leurs incohérences. Les avis sont nuancés, et ne font jamais référence au catalogue des promesses que nous avons pu présenter. Une différence majeure émerge malgré tout par rapport aux précédentes générations de dispositifs numériques : les systèmes d'IA peuvent émettre des propositions (classification de défauts par exemple), lesquelles peuvent entrer en confrontation avec les avis des techniciens. Mais ceux-ci, au moins lorsqu'ils sont expérimentés, n'ont pas peur de les contredire, et d'expliquer pourquoi. Ce qu'on constate en bref, c'est que la rationalité du travail réel vient évaluer l'introduction des

[173] Ce sont systématiquement les ingénieurs des bureaux qui présentent les nouveautés, changements, résolutions de problème, et répondent aux questions. Positionnées après des services de huit heures d'affilée en salle blanche, ces réunions accueillent des techniciens déjà bien fatigués par leur journée de travail.

[174] Les techniciens travaillent parfois en local, c'est-à-dire sur une machine particulière pilotée par un ordinateur non connecté au réseau. Mais la plupart du temps, ils sont connectés audit réseau qui permet d'avoir une vision globale des lots actuellement présents dans le service qualité.

[175] Nos échanges se sont tenus lors de sessions d'observation de leur travail où leur attention devait se concentrer sur leurs tâches habituelles (assez lourdes cognitivement).

technologies en regard d'une transformation du travail pratique, et concrète, ainsi que des conditions de sa réalisation.

Une rationalité en conflit

Cette dichotomie entre rationalité gestionnaire et rationalité du travail réel dans le déploiement de l'IA émane d'un récent travail porté par les sociologues S. Borel, Y. Ferguson et J. Condé (2024a; 2024b). Dans une récente enquête pour le LaborIA, ces auteurs se sont plongés dans des organisations très diverses confrontés au déploiement de systèmes d'IA : aéronautique, édition, commerce en ligne, administration publique. Ils montrent que les changements technologiques des organisations confrontent ces deux rationalités concomitantes.

La rationalité s'entend ici dans la lignée des travaux sur la « rationalité limitée » (Simon 1982). Il ne s'agit pas d'une rationalité pure, ou d'une logique attachée à des agents économiques abstraits aux choix parfaits. La rationalité limitée est plutôt conçue comme une conception située et subjective du réel.

En l'occurrence, montrent les auteurs, la rationalité gestionnaire « représent[e] l'ensemble des moyens (procédures, indicateurs, instruments, etc.) orientés vers l'optimisation et le renforcement de l'efficacité et l'efficience d'une organisation (fiabilité, sécurité, rentabilité, compétitivité, productivité, réduction des coûts et de l'incertitude) ainsi que la croyance dans la capacité de l'innovation à améliorer les performances et la productivité du travail » (Borel et al. 2024a:13). Elle est essentiellement rattachée à des contraintes externes, typiquement liées aux marchés mais aussi aux législations en vigueur, et vise la survie de l'entreprise.

La rationalité du travail réel, quant à elle, « part des préoccupations concrètes des travailleurs confrontés à l'IA sur la manière de vivre et d'exercer leur travail au quotidien. » (Borel et al. 2024a:13). Elle peut les mener à se départir de l'organisation formelle du travail pour adopter des pratiques d'appropriation, de contournement, de résistance, de sorte à remplir des « objectifs d'organisation de la production et de défense des intérêts des salariés » (Reynaud 1988:9).

On retrouve dans cette opposition entre rationalités la distinction entre travail prescrit et travail réel qui est à la base des analyses de la sociologie des organisations. J.-D. Reynaud (1988) a reporté ce débat en recourant au terme de régulation : « régulation de contrôle » et « régulation autonome ». En mobilisant les travaux de D. Roy (1954), J.-D. Reynaud montre que l'on ne peut réduire le conflit de rationalités à une opposition entre logique d'efficacité portée par la hiérarchie, et logique « des sentiments[176] », liée aux salariés. Il peut en effet arriver que des salariés mobilisent des objectifs d'efficacité pour s'assurer un meilleur revenu, tandis que leur direction, attachée à ses règles de fonctionnement, les freine dans cette entreprise. Ce qui distingue les deux groupes est avant tout, pour J.-D. Reynaud, la recherche du contrôle de l'organisation du travail par les cadres, face à des salariés en quête d'autonomie dans leur pratique.

Le conflit émerge d'objectifs concurrents poursuivis par ces deux rationalités, incarnées d'un côté par les décideurs, les managers, et de l'autre par les salariés, souvent réduits au seul rôle d'exécutant,

[176] On doit le terme, dont la désuétude est presque provocante, à des travaux antérieures à la Seconde guerre mondiale, aux prémices de la sociologie des organisations (Roethlisberger et Dickson 2003).

voir (Figure 32). Le travail réel que fournissent ces derniers n'est pas toujours bien connu par les échelons hiérarchiques supérieurs qui envisagent des solutions basées sur leurs propres représentations du travail prescrit. Cette perception peut porter en elle un certain préjugé sur ce qui est automatisable ou non, d'où l'encouragement dans l'implémentation de certains systèmes d'IA dont le succès paraît plié d'emblée. Ce constat justifie la position de D. Muhlmann (2001:342) : « on ne peut séparer l'analyse des effets sociaux d'une technologie informatique de celle de la stratégie de son implantation et des objectifs poursuivis par la médiation de cette technologie. » Comme nous l'avons dit, en effet, les promesses d'efficacité des systèmes d'IA circulent abondamment à SemiCorp et contribuent à cadrer la manière dont leur déploiement est envisagé. Par des projets d'automatisation lancés *a priori*, suivant des modalités de consultation pas toujours approfondies, le recours à l'IA est une façon supplémentaire d'atténuer l'autonomie du travail.

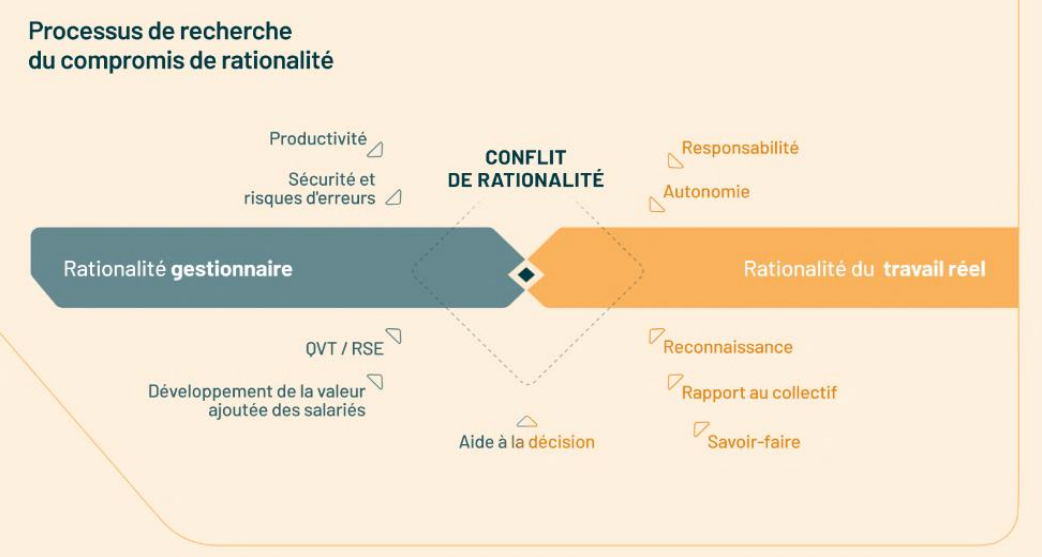


Figure 32 : Le conflit de rationalité, par S. Borel, Y. Ferguson et J. Condé (2024b).

Il ne faut pas non plus oublier que le rapport hiérarchique vient asymétriser le confit de rationalité. Les techniciens sont placés dans un environnement dans lequel ils doivent *faire avec*. Le conflit de rationalité ne se traduit ainsi pas nécessairement par un éclatement abrupt (nous présenterons un contre-exemple dans la sous-section suivante), ou par des tensions profondes qui n'attendraient que cet éclatement. Il peut simplement peser sur les conditions de travail, aussi bien celui des ingénieurs que celui des techniciens, qui se voient encouragés à faire plus, plus vite, tout le temps. Juste avant les fêtes de fin d'année 2022, le PDG de SemiCorp adresse ses vœux sous format vidéo à l'ensemble des salariés, qu'il remercie pour leur participation active à la vie de l'entreprise ; il la conclut de la façon suivante : « Vous avez tous travaillé sans relâche, et je sais que je peux compter sur vous pour faire de même en 2023. » Les mots sont prononcés dans le contexte d'une forte augmentation de la production, qui a pu augmenter la charge générale de travail dans l'entreprise (ce que nous ont confirmé plusieurs enquêtés). Pas si anecdotiques que cela, ces vœux normalisent l'augmentation de l'intensité du travail, qui devient l'attente par défaut de la hiérarchie. La rationalité gestionnaire est en ce sens la rationalité standard qui guide l'action par défaut. C'est aux tenants de la rationalité du travail réel de fournir les éléments de preuve d'impasse organisationnelle ou technique.

Dans la sous-section suivante, nous montrerons justement comment s'illustre ce conflit de rationalité dans les interactions de l'équipe IA avec le service Qualité. Nous nous intéresserons plus particulièrement au rôle du responsable de déploiement dans la mise en œuvre d'une stratégie d'acceptabilité faite pour atténuer le conflit de rationalité.

2.b. Faire accepter l'IA

C'est la réunion matinale traditionnelle dans le service Qualité. Tout le monde est sommé d'y participer. Elle se tient sur un logiciel de visio-conférence où personne ne met sa caméra. Chaque jour, une personne différente présente la réunion, suivant un planning préétabli (bien qu'il soit flexible suivant les absences anticipées des membres de l'équipe). La personne en charge de la présentation est, comme toujours, arrivée un peu en avance pour aller rencontrer les équipes de la salle blanche, dont certains membres ont embauché à 5h du matin. Pour la plupart des ingénieurs des bureaux, ce passage en salle blanche pour la préparation de la réunion du matin est la seule occurrence lors de laquelle ils s'y rendent, tous les deux mois environ.

C'est la réunion matinale traditionnelle mais elle ne l'est pas encore pour moi, car c'est la première fois que j'y participe. Je suis à côté de Régis, le responsable de l'équipe IA, qui gère ma présence sur le site ; il m'a gentiment installé à côté de son bureau. Je n'ai pas encore d'ordinateur à ma disposition, nous regardons donc ensemble la présentation de l'état des lieux de la production : quelles machines seront indisponibles dans la journée, quelles alertes qualité sont en train d'être investiguées. Avant que la réunion ne s'achève, Régis allume la caméra de son écran où j'apparais timidement dans un coin. Il me présente en ces mots : « Voilà Louis Devillaine. Il va nous aider sur le ClassifiMotif et puis il va étudier le lien avec l'humain[177]. » Je suis un peu étonné par la formulation sur le coup mais après tout, Régis n'a pas tort, la sociologie a bien l'occasion s'intéresse bien aux relations entre individus et technologies.

Ce que je comprendrai plus tard, immergé plus intensément dans la vie de l'équipe, c'est que ce « lien avec l'humain » tel qu'il est conçu par Régis ne concerne pas vraiment l'interaction humain-machine dans un rapport de pratiques ou d'évolution des compétences. Tandis qu'il met fin à la réunion, Régis a en tête d'autres préoccupations qui concernent l'adhésion des salariés aux technologies.

Une crise de l'adhésion

Plusieurs mois avant mon arrivée, un premier système d'IA a été déployé dans le service : le CatégoDéfo. Le but du CatégoDéfo est de classer par type les défauts présents sur chaque plaque. Pour cela, des images lui sont fournies et, pour chacune d'elles, le CatégoDéfo indique si un défaut y est constaté (par exemple, présence d'une particule en surface de la plaque, ou en profondeur) et, si oui, le catégorise de façon idoine, voir (Figure 33). Dans le schéma de la chaîne d'analyse que nous avons présenté (Figure 28), l'usage du CatégoDéfo concerne l'activité « classer les défauts » dans la partie « Analyse ». Cette tâche préalable est impérative à l'analyse de problème qualité. Originellement réservée aux techniciens en salle blanche, elle est déléguée – du moins, c'est le but de ce projet – à ce nouveau système. Un gain de temps substantiel est escompté : comme j'ai pu le constater, les techniciens peuvent avoir à classer des centaines de défaut pour chaque plaque, une tâche fastidieuse qui demande de la concentration et prend plusieurs minutes. Le CatégoDéfo est d'abord développé en interne par Jérôme, un ingénieur qualité qui travaille seul sur le projet en collaboration avec le service Informatique de SemiCorp. Jérôme

[177] Propos recueillis lors d'une réunion quotidienne en juin 2022, approximation.

est chargé de leur transférer une base de données à partir de laquelle le service Informatique[178] génère un modèle d'IA qui sert de base d'entraînement au CatégoDéfo.

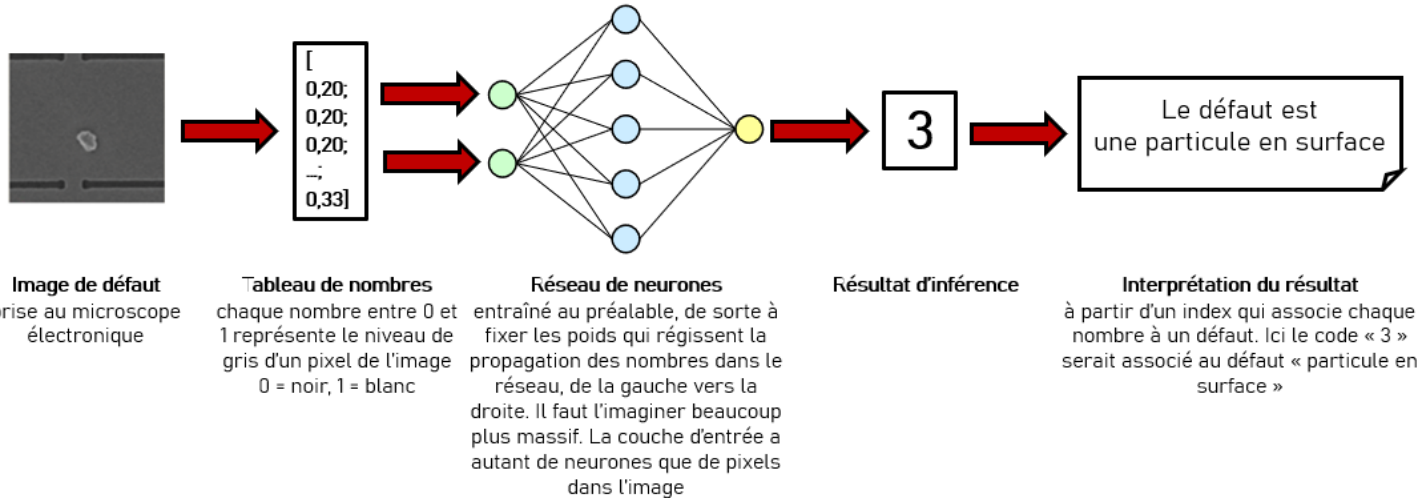


Figure 33 : Principe de fonctionnement du CatégoDéfo. L'image est convertie en un tableau de nombres qui sont fournis en entrée d'un réseau de neurones artificiels. Après traitement, le modèle fournit un nombre, qui peut être interprété à partir d'un index de défauts réalisé par les concepteurs. L'image de défaut est tirée de (Graur et al., 2015) et le réseau de neurones provient de la page « Réseaux de neurones artificiels » de Wikipédia.

Le déploiement du CatégoDéfo se passe en fait très mal. Les bonnes performances obtenues lors de la conception du système ne se vérifient pas lorsqu'il est mis en place dans des situations pratiques. Les résultats donnés par le dispositif ne correspondent que rarement à ceux que donnent eux-mêmes les techniciens. Pourtant, ces derniers ont besoin de classer les défauts pour faire leur analyse. Résultat, m'explique Jérôme : « Au début les gens ne faisaient pas du tout confiance au CatégoDéfo, ils refaisaient systématiquement les annotations, le travail était fait en double[179]. » Pendant de nombreuses heures, l'introduction du CatégoDéfo contribue ainsi à une diminution de la productivité du service Qualité, car les techniciens qualité doivent remplacer manuellement les classifications effectuées par le système.

Peut-on vraiment parler de dynamiques de résistance au changement dans ce contournement du dispositif en faillite ? Le cas suggère plutôt que la conception du système a oublié de s'inscrire dans les conditions de travail réel. L'interface a été conçue sans consultation avec les techniciens, qui ne l'ont pas testé. Après une période de panique où le service Qualité est en crise (la « baignoire » étant bouchée et menaçant de déborder), le CatégoDéfo est finalement démis de ses fonctions.

Retour à la situation initiale ? Pas vraiment, du point de vue des ingénieurs des bureaux, car ils estiment que la confiance dans le système est brisée. Pendant de longs mois, alors qu'ils font des essais plus partiels de déploiement du CatégoDéfo, ils réalisent que les techniciens qualité continuent à reclassifier les résultats, c'est-à-dire à sciemment classer un défaut autrement que le résultat indiqué par le CatégoDéfo. C'est sur la longueur, après avoir retravaillé sur le système, l'avoir adapté aux demandes

[178] En réalité, comme me l'explique par la suite Jérôme, ce service informatique a des compétences limitées en IA et sous-traite la partie technique de la création de modèles d'apprentissage machine à une société de conseil, ce qui participe à chaîner un réseau d'interdépendance qu'il trouve particulièrement frustrant.

[179] Propos recueillis lors d'une discussion informelle, en juin 2022, approximation.

des techniciens, et avoir intégré des données plus proches de l'utilisation réelle, que le système s'intègre progressivement dans les pratiques. « Il en a fallu du travail, » soupire Jérôme, « ça a pris deux ans. J'ai accès à des indicateurs, il y en a un qui est la recodification, c'est le taux de reclassification, il est passé de 35 % à 10 %[180]. » Lors de mes visites en salle blanche, je constate que le CatégoDéfo est désormais un système qui fait partie des pratiques quotidiennes, et se trouve être plébiscité ; certains techniciens souhaiteraient le voir généralisé (car il ne concerne pour l'instant que certains types de plaques). Après avoir été éprouvé par la pratique réelle et apparaître utile aux techniciens, CatégoDéfo serait maintenant accepté par eux.

Construire l'adhésion : entre acceptabilité et acceptation

Dans leur article sur l'adhésion des organisations aux technologies, M. Bobillier-Chaumon et M. Dubois (2009) évoquent la notion d'acceptabilité par contraste avec celle d'acceptation. L'acceptabilité renvoie d'abord à différentes visions qui évaluent la façon dont des déterminants organisationnels, sociaux ou cognitifs peuvent favoriser l'adhésion d'un collectif aux technologies qui leur sont présentées. Le problème, expliquent les auteurs, c'est que « [l]es modèles [d'acceptabilité], très intéressants pour éclairer les probabilités d'adoption de la technologie et déterminer la faisabilité des projets en retenant certaines solutions, évacuent cependant les contraintes et les contradictions propres au monde réel et à la subjectivité individuelle. » (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009:361). L'acceptation technologique quant à elle est définie « comme le déploiement d'un ensemble des conduites réelles d'adoption mises en œuvre par l'individu et/ou un collectif, dans le cadre des activités effectives au sein de l'organisation. » (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009:362). L'analyse de ces auteurs est avant tout théorique. Ils dégagent différents champs de la psychologie sociale et ces deux perspectives correspondent à des postures adoptées (plus ou moins explicitement) par la littérature.

Ces approches sont-elles cependant réservées à la recherche ? Nous estimons que non : il s'agit de modèles mentaux qui peuvent être suivis par les individus eux-mêmes, qui peuvent penser en termes d'acceptation et d'acceptabilité. C'est pourquoi nous exportons cette distinction pour la considérer à l'aune des choix opérés au sein des organisations. Nous suggérons que là où des acteurs concentrés sur l'acceptabilité favorisent l'hégémonie de la rationalité gestionnaire, une approche fondée sur l'acceptation permet un meilleur retour à l'équilibre dans le compromis de rationalité. C'est ce que nous proposons de montrer en conclusion de ce chapitre.

Stratégiser le déploiement

L'expérience du CatégoDéfo a constitué une phase « d'apprentissage organisationnel[181] » (Kœnig 1994), mobilisée ensuite par Régis, devenu responsable de l'équipe IA entre temps. Au travers de cet échec, qui a pesé sur l'équipe IA (alors émergente) mais aussi sur l'entièreté du service Qualité (confronté à des retards de traitement des analyses de qualité), l'équipe a ré-envisagé le déploiement de ses systèmes

[180] *Idem*.

[181] Le concept est entendu ici plutôt dans sa dimension de la gestion de l'expérience acquise plutôt que l'intelligence de l'expérimentation en cours.

sur la base d'une stratégie nouvelle[182]. Nous proposons de la caractériser comme un processus de construction de « l'acceptabilité » du système, plutôt que de son acceptation (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009). C'est en tout cas le défi que s'est donné Régis, en tant que « responsable de la digitalisation[183] », pour le lancement du second projet de l'équipe, le ClassifiMotif[184].

La stratégie d'acceptabilité se fonde sur plusieurs piliers. Nous aurons l'occasion d'en détailler l'architecture dans les chapitres ultérieurs. Nous nous concentrerons pour l'instant sur sa dimension rhétorique, à savoir le recours à la promesse.

Une stratégie d'acceptabilité : relayer les promesses

La transmission d'une vision, d'un désir, constituent une partie intégrante de la stratégie d'acceptabilité, qui passe par un relai de la promesse technologique autour d'un pilier discursif que nous connaissons bien désormais : l'inéluctabilité et de la nécessité du déploiement technique. Dans ce discours, c'est en partie l'absence de choix qui guide le changement. Toujours lors d'une réunion avec les techniciens qualité, dont un segment est présenté par Régis, celui-ci s'exclame par exemple : « On doit moderniser nos façons de faire […] on doit simplifier nos process […] on doit améliorer le confort de travail[185]. » Dans le récit ainsi composé, la numérisation de l'activité s'accompagnerait par principe d'un travail plus fluide et agréable. Le discours articule ainsi la dimension de la nécessité du changement avec celle de l'amélioration des conditions de travail. Pourtant, nous l'avons noté dans le premier chapitre, cette inéluctabilité est d'abord relative à la survie économique des acteurs industriels. Mais c'est en fusionnant ces deux registres qu'il est possible d'aboutir à une promesse conciliante qui est supposée satisfaire à la fois des exigences d'efficacité et de qualité de l'environnement de travail[186].

A quel point peut-on ici parler d'une stratégie rhétorique ? En réalité, au-delà de la mobilisation d'arguments à des fins de conviction de leur auditoire, certains managers paraissent totalement persuadés de la nécessité sociale du déploiement de l'IA. A ce sujet, une expérience de restitution m'a particulièrement ébranlé.

Petit bond dans le temps, alors que je propose comme promis une synthèse finale à l'équipe IA qui m'a accueilli dans le service Qualité. Nous sommes en février 2024 : Régis, Jérôme et Etienne, un autre ingénieur – qui a commencé sa carrière comme technicien en salle[187] –, sont présents avec moi. Pour une fois, c'est moi qui présente quelque chose. Faisant état d'une analyse de surface, relative au contexte

---

[182] Ce que nous nommons ici « stratégie » est, à notre connaissance, relativement implicite. Le processus n'est pas nécessairement envisagé comme tel par les acteurs rencontrés.

[183] C'est ainsi qu'il se présente lors d'une réunion avec des techniciens.

[184] *A posteriori*, Régis adopte une posture réflexive à ce sujet, il note par exemple : « Dans [le projet du ClassifiMotif], y'a deux loupés que je vois : la communication, et puis on a pas pensé à l'utilisateur final. » (Propos recueillis en réunion en février 2023).

[185] Propos recueillis en réunion en septembre 2022.

[186] Il faut malgré tout noter que Régis, le manager de l'équipe IA, et son équipe sont eux-mêmes soumis à des contraintes de bon et rapide déploiement. Leur stratégie d'acceptabilité s'incarne dans leur propre recherche d'un compromis entre contrôle venu des plus hauts cadres, et d'autonomie dans le déploiement des systèmes d'IA.

[187] Il continue, d'ailleurs, de se qualifier lui-même de « technicien ». Nous le présentons ici comme un ingénieur à des fins de simplification du propos, mais un profil comme celui d'Etienne contribue à la subtilité des analyses trop simplistes qui opposeraient simplement travailleurs des bureaux et travailleurs des salles blanches.

socio-économique dans lequel s'inscrit le projet, je suggère au cours de la présentation que le processus de digitalisation est le reflet d'un impératif avant tout économique, en lien avec les projets d'augmentation de la production du site de SemiCorp. Il me semble que j'exprime là une banalité mais, à ma surprise, Régis m'interrompt pour exprimer son profond désaccord. Il insiste pour dire que le déploiement de l'IA répond à un impératif social. En effet, explique-t-il, les cadences de production ne seraient pas soutenables sans des formes d'automatisation. Sans elles, le travail deviendrait invivable. C'est donc comme une assistance des salariés qu'il conçoit l'IA : la technologie est un vecteur de soulagement. Les choix économiques qui président l'action de l'équipe IA sont pleinement intériorisés comme des choix nécessaires et implacables, lesquels construisent ainsi un cadre d'action dans lequel chacun doit s'adapter : il n'est pas envisagé de les remettre en question, ni même de les verbaliser[188].

Ce manque de marge de manœuvre des managers de proximité, chargés de changements qu'ils doivent conduire alors qu'ils n'en sont pas à l'origine, est l'objet de grandes souffrances au travail pour eux (Oiry et Vignal 2016). Il ne s'agit donc pas de leur prêter des intentions malignes, mais de constater que leur positionnement est doublement contraint par la rationalité gestionnaire (représentée par la hiérarchie, mais aussi par l'intégration d'indicateurs de performance qu'ils s'efforcent d'améliorer) et la prise en compte du travail réel.

Dans le même temps, en effet, les managers ne mentionnent jamais, auprès des techniciens, les arguments en faveur du déploiement des systèmes d'IA qui concerneraient la propension à l'erreur des techniciens. Au contraire, ils insistent sur la façon dont ces systèmes valorisent le travail, au travers d'une notion importante, dont l'usage transcende les échelons de l'organisation : la valeur ajoutée.

Une solution discursive au conflit de rationalité ? La « valeur ajoutée »

C'est bien simple, sur nos deux terrains, la majeure partie des enquêtés, directeurs, managers, ingénieurs (de tout niveau hiérarchique, techniciens mis à part) nous ont parlé de valeur ajoutée. L'introduction de l'IA serait l'occasion de se recentrer sur la valeur ajoutée du travail. A notre connaissance, la notion de valeur ajoutée n'a pas été investiguée par la sociologie comme instrument discursif[189]. Sur le plan économique, la valeur ajoutée « correspond à la richesse produite lors du processus de production » (Faciléco 2018). Elle permet d'une certaine façon de quantifier la valeur du travail fourni, et s'entend parfois de façon relative (elle est « ajoutée » par rapport à un existant). Mais elle est souvent mobilisée d'une manière bien différente – et en fait ambiguë – par les acteurs industriels que nous avons rencontrés. Nous avons pu distinguer deux autres acceptions : la première renvoie à la valeur ajoutée d'une tâche, quand la seconde décrit la valeur ajoutée comme une expression de la subjectivité et de la compétence des salariés. On retrouve dans cette dichotomie les divergences

[188] Nous avons pris le parti de ne pas revoir notre analyse à la suite de cet échange, mais plutôt de l'intégrer comme un élément de terrain en soi. Maëva Leulier-Blanchard et Enzo Villalta, doctorants au laboratoire Pacte, ont conduit un groupe de réflexion sur les enjeux et les modalités de ce travail plus ou moins caché de la restitution d'enquête. C'est à leur contact que nous avons pris conscience de l'intérêt d'une attention pour cette expérience de la recherche, aussi bien comme moment de partage, de validation, que comme un moment de collecte de données à part entière.

[189] Les rares travaux portant explicitement sur la « valeur ajoutée » questionnent par exemple les indicateurs de valeur ajoutée pour les établissements de l'enseignement secondaire (Núñez-Regueiro et Bressoux 2023).

définitionnelles de la qualification, tantôt attachée au poste de travail (un *travail qualifié*), tantôt associée à l'individu lui-même (un *travailleur qualifié*) (Oiry 2005).

Le premier sens de la valeur ajoutée est généralement entendu de façon négatif. Certaines tâches seraient à « faible valeur ajoutée », parce qu'elles sont perçues par les ingénieurs et managers comme étant répétitives, fastidieuses. Il nous faut aller plus loin dans l'analyse car, après tout, il existe de nombreuses tâches fastidieuses mais toutes ne sont pas qualifiées comme étant à faible valeur ajoutée[190]. En réalité, les tâches à faible valeur ajoutée sont exactement celle qui étaient ciblées par les études qui prévoyaient une vague d'automatisation massive dans les années 2010[191]. Elles sont dénigrées parce qu'elles ne sont pas perçues comme intéressantes (par des personnes qui ne les réalisent pas elles-mêmes), certes, mais surtout parce que leur automatisation est envisageable. L'une de nos premières conversations avec Régis pointe dans cette direction[192], alors qu'il m'explique que le temps de travail devrait être concentré sur des tâches de prise de décision, qui sont celles qui ont la plus forte valeur ajoutée. Cette illustration est d'autant plus parlante que les systèmes développés par l'équipe IA sont eux-mêmes chargés de prendre des décisions (présence d'un motif de défauts par exemple). Mais ces tâches sont automatisables, contrairement (pour le moment) à l'investigation, dont la valeur ajoutée est ainsi perçue comme plus élevée.

La seconde acception de la valeur ajoutée se rapporte à la subjectivité des individus eux-mêmes. Elle désigne un potentiel à accomplir : les managers parlent volontiers de laisser la possibilité aux techniciens, par la technologie devenue libératrice, d'exprimer leur valeur ajoutée. Cette valeur ajoutée, de façon implicite, se réfère à leur expérience, leurs compétences, acquises en travaillant en salle blanche. Elle est tout à la fois individuelle, car chaque technicien peut apporter sa valeur ajoutée sous ce prisme, mais aussi collective, car il n'est pas conçu que la valeur ajoutée de certains techniciens puisse justement résider dans les tâches en voie d'automatisation. Cette autre acception managériale de la valeur ajoutée se rapporte plus finalement à l'épanouissement des techniciens. Elle repose sur l'idée qu'en étant affectés à des tâches où leurs compétences sont véritablement requises, les techniciens se sentiraient plus utiles, et prendraient plus de plaisir au travail.

Ambiguë valeur ajoutée

La notion de valeur ajoutée porte ainsi en elle une ambivalence sémantique. Celle-ci représente à notre sens une clé de résolution du conflit de rationalité du point de vue des managers, qui diffusent l'expression à l'envi, de sorte qu'elle finit par être adoptée par les membres de leurs équipes. Parler en termes de valeur ajoutée permet à la fois d'évoquer l'intérêt économique de l'automatisation d'un travail intellectuel mécanisable apportant peu de valeur (acception 1), mais surtout, pour les salariés, l'intérêt d'une réduction de la pénibilité du travail grâce aux systèmes automatisés (acception 2). Les différentes rationalités, respectivement gestionnaire d'une part, et du travail réel d'autre part, sont ainsi satisfaites par une attention qui leur paraît être portée en priorité. La notion de valeur ajoutée, diffusée par le discours

[190] C'est par exemple le cas de l'annotation des bases de données, travail qualifié par les ingénieurs de l'équipe IA comme très fastidieux et répétitif. Ils ne qualifient pourtant jamais cette tâche comme étant à faible valeur ajoutée.

[191] Typiquement celles qui ont été présentées par Carl B. Frey et Michael A. Osborne ([2013] 2017).

[192] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2022.

managérial se pose ici comme « discours ambigu » (Pesqueux 2011), une façon d'évoquer des logiques différentes, de les faire cohabiter, tout en contentant tout le monde.

En dépit de cette conciliation apparente des promesses de l'IA, l'ambiguïté véhiculée par l'idée de valeur ajoutée n'est pas pleinement suffisante à rassurer les salariés. Etienne, ingénieur de l'équipe IA devenu responsable de l'amélioration du CatégoDéfo pendant mon enquête, se montre ainsi peu à l'aise quant à l'anticipation de l'évolution de son travail : « Je sais pas où sera ma valeur ajoutée quand ça marchera[193]. » L'amélioration continue du système sur lequel il travaille, de son point de vue, doit atteindre une fin. La promesse d'inéluctabilité de l'automatisation progressive du travail reste fermement ancrée, mais vient dès lors contredire la garantie d'un travail épanouissant sur le long terme, dont la valeur ajoutée serait préservée. En faisant miroiter la possibilité d'un « employé réhumanisé » (Ferguson 2019) tout en grignotant petit à petit ce qui constitue la fierté du travail des salariés, les promesses déçues pourraient bien participer à la « crise du sens » au travail (Vassal 2006).

[193] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en janvier 2023.

Conclusion (II.2)

Nous l'avons vu, de façon générale, les enquêtés rencontrés à SemiCorp nous ont paru relativement perméables aux promesses de l'IA. Plus l'on monte dans la hiérarchie, et plus l'on s'éloigne du travail réel, plus l'intérêt économique de l'IA est souligné. La comparaison humain-machine, en outre, est régulièrement mobilisée par les acteurs, quel que soit le niveau hiérarchique. Paradoxalement peut-être, les promesses concernant l'épanouissement du travail par l'assistance technologique sont également prégnantes.

Dans le même temps, en nous plaçant du point de vue de ces équipes aux prises avec le flux de production et l'utilisation réelle de l'IA, nous avons constaté l'absence de l'imaginaire robotique que nous avions identifié dans la sous-section (**I.**2.a), pourtant présent dans la communication de l'industrie du semiconducteur. Cela confirme les intentions promotionnelles et la portée limitée d'un discours qui ne vise pas nécessairement ses propres salariés.

La proposition que nous avons tenté de défendre pour expliquer cette diffusion abondante des promesses tient de la tentative de résolution d'un conflit de rationalité opposant logique gestionnaire et travail réel. En se concentrant sur l'acceptabilité du système, l'équipe IA est amenée à valoriser aussi bien la plus-value qu'apporterait ses dispositifs sur l'amélioration du suivi de la production que sur l'amélioration du travail des techniciens. Ce compromis apparaît essentiellement sur le plan discursif, comme nous le verrons dans des chapitres suivants. L'organisation ne traduit pas nécessairement en actes les promesses formulées sur le travail, qui servent à convaincre plus qu'à véritablement accompagner la transformation des modalités du travail.

Ce pan de la thèse vient nuancer le statut de l'industrie acheteuse d'IA comme simple réceptrice des promesses qu'elle porte. Ces promesses sont réinterprétées en interne, en les faisant varier selon les interlocuteurs, dans le but de faciliter le bon déploiement des nouvelles technologies. La mise en récit opérée par les entrepreneurs de l'IA fait certes naître un narratif associé à l'IA, mais il ne le détermine pas : il est reconstitué de façon opportuniste par les acteurs. De la même façon qu'avec les imaginaires sociotechniques (Joly 2015), les promesses constituent ainsi des répertoires dans lesquels les acteurs, et notamment les managers, peuvent puiser pour tenter de convaincre leurs subordonnés. Les mécanismes d'enrôlement d'acteurs (états, entreprises, investisseurs) observés à l'échelle macroscopique trouvent ici une résonance avec des interactions plus mésoscopiques, à l'échelle même des équipes.

3. Réappropriation des promesses de l'IA par les managers de l'industrie

Au-delà de leur instrumentalisation dans le cadre de projets technologiques, comment les promesses de l'IA sont-elles analysées, à froid, par les acteurs de l'industrie ? Pour répondre à ce questionnement, et dans l'objectif d'étudier la « perception » de l'IA dans un cadre industriel un peu différent, nous proposons de changer brièvement de paysage – en gardant cependant quelques arbres.

Nous nous appuierons, l'espace de cette section, sur une autre étude de terrain dont nous avons décrit les contours en introduction. L'enquête a pris place au sein de Mecanex, une entreprise présente dans plusieurs pays, et qui compte plusieurs milliers salariés. Mecanex construit en particulier des équipements de salles blanches et elle est fournisseur de SemiCorp, la firme du secteur de la micro-électronique, plus grande, dans laquelle nous avons également effectué une étude (antérieurement). Le matériau est essentiellement constitué d'entretiens. Les personnes interrogées (responsables d'équipes ou de projets pour la plupart) ont pu partager leur vision de l'IA et du changement, dans un cadre où l'heure est pour le moment aux expérimentations. Les méthodes d'apprentissage machine n'ont en effet pas (encore) intégré l'offre de services de l'entreprise.

Les acteurs que nous avons rencontrés à Mecanex planchent sur un projet de maintenance prédictive. Celui-ci concerne les équipements complexes, installés dans des salles blanches que conçoit et fabrique l'entreprise. Ces équipements sont mis en concurrence avec d'autres équipements similaires fabriqués par d'autres entreprises, ce qui pousse Mecanex à vouloir se démarquer et à innover. La maintenance tient une part importante dans la culture de l'entreprise, une « boîte de mécanos » (selon l'un des responsables rencontrés) attachée à la matérialité des machines qu'elle produit. Le site que nous avons visité dispose par exemple d'un centre de réparation où arrivent des machines endommagées, envoyées par les clients dans le but de les remettre à neuf. Mais le travail est également réalisé sur place en salle blanche, directement chez les clients de Mecanex (et notamment à SemiCorp), où des techniciens de maintenance détachés sur site à l'année sont amenés à entretenir et réparer des machines.

Dénicher les promesses dans le discours recueilli

Lors de nos entretiens, nous avons été frappés par la dissonance existant entre les promesses identifiées dans le chapitre précédent, et la façon dont elles pouvaient être réexprimées, parfois de façon totalement contraire, par les enquêtés. Leur discours peut en effet révéler de façon explicite ou implicite des proximités comme des rejets des promesses que nous avons présentées. Nous chercherons à évaluer comment elles sont sélectionnées (c'est-à-dire considérées comme crédibles) et réinterprétées au sein de Mecanex.

Le but de cette analyse ne sera donc pas tant ici d'évaluer la reproduction de la promesse au sein de l'industrie de la micro-électronique – ce que nous avons fait dans la précédente section – mais plutôt sa circulation dans une industrie qui lui est adossée. Après avoir présenté le contexte de transition du modèle économique de Mecanex vers une économie de services (3.a), cette revue sera en fait l'occasion de revenir sur les différentes promesses que nous avons mise en avant dans la partie (**I.**2). Nous aborderons les motifs discursifs liés à la temporalité du changement dans l'industrie, en voyant qu'ils sont finalement

inextricables des promesses de l'IA qui portent sur ses avantages économiques (3.b). L'examen portera ensuite sur la correspondance du discours avec les promesses techniques de l'IA formulées en termes de comparaison humain-machine (3.c). Pour terminer, nous aborderons la façon dont les promesses concernant le travail sont, en fait, recentrées sur la question de la compétence (3.d). Des éléments conclusifs tenteront d'expliquer pourquoi ces promesses ne sont pas pleinement intégrées par les acteurs.

3.a. La servitisation : quand l'IA accompagne les changements de modèle d'affaire

L'intérêt de l'IA ne réside pas seulement dans l'outillage de l'appareil productif de l'industrie. En réalité, elle permet également d'envisager une nouvelle façon pour les acteurs industriels de commercer. Pour replacer Mecanex dans son contexte économique, nous proposons de montrer comment les promesses économiques concernant l'IA ont pu être réinterprétées en intégrant l'IA dans des modèles d'affaires émergents.

Vendre du service

Imaginons une entreprise quelconque, celle-ci vend des produits à des particuliers ou d'autres entreprises. Une fois vendus, en principe, les produits n'évoluent plus : le livre, la tuyauterie, la machine qui ont été achetés restent les mêmes. Cette façon de voir les choses est très réductrice : on peut contacter le service après-vente si le livre est trop abîmé, faire venir quelqu'un pour installer la plomberie, ou se former à l'utilisation de la nouvelle machine. En vérité, même les entreprises qui ne vendent pas explicitement des services (industries, commerces) incluent du service dans leurs activités.

En pratique, on peut dénombrer trois types de services rendus par les entreprises : ils relèvent de l'accommodation, l'adaptation, ou la substitution[194] (Cusumano, Kahl, et Suarez 2015). L'accommodation renvoie d'abord aux services qui permettent d'assurer la vente ou l'usage d'un produit, ce sont ceux que nous venons de donner en exemple. Elle est généralement contractualisée, tout du moins explicite. Le service après-vente, la maintenance et la réparation, la formation, l'assurance sont autant de formes de l'accommodation. Un second type de services, dits d'adaptation, concernent la transformation du produit après achat, notamment pour introduire de nouvelles fonctionnalités ou développer de nouveaux usages. Ces services demandent une connaissance technique approfondie du produit en question, qui peut être personnalisé pour la demande spécifique d'un client. Les auteurs de l'article donnent l'exemple de l'entreprise General Electric qui, sur demande de ses clients, adapte ses générateurs d'électricité pour les rendre résistants face aux conditions météorologiques des sites dans lesquels ils sont implantés. Enfin, la substitution consiste à concentrer la transaction sur un service plutôt que sur le produit. On pense par exemple à la location, lors de laquelle l'achat n'est pas celui d'un produit (un vélo) mais plutôt un service (un vélo à la semaine, que l'on rend ensuite). Il y a de nombreuses raisons pour lesquelles des entreprises, alors même qu'elles se concentrent en principe sur la manufacture et vente de produits, sont amenées à développer une offre de services : ils leur permettent de se différencier sur le marché, d'approfondir la relation-client au travers d'une amélioration de leurs produits et, plus ou moins directement, de générer plus de profit (Cusumano et al. 2015).

La servitisation

Avec le développement des technologies numériques, le service peut prendre des formes différentes. Des produits statiques (au sens où leurs fonctionnalités n'évoluaient pas sans intervention directe) deviennent des produits connectés (on lit parfois *smart*). Désormais accessibles à distance, ils peuvent

[194] Respectivement *smoothing*, *adapting*, *substituting* (notre traduction).

être modifiés pour satisfaire les besoins des clients. Cette possibilité inaugure des stratégies de « personnalisation de masse » où chaque client est susceptible d'obtenir un produit qui conviendrait parfaitement à ses besoins[195] (Kumar 2007). La personnalisation peut s'opérer aussi bien dans la phase de production (paramétrage différencié des machines suivant la demande), que durant la phase d'usage, alors que le client dispose de l'objet matériel dans ses locaux. Dès lors, l'adaptation du produit (deuxième type de service) peut être effectuée à distance, en continu[196]. Cela permet aux entreprises de ne plus seulement vendre un produit, mais d'y adjoindre un service insécable. Ce processus de transformation du modèle d'affaire vers l'incorporation toujours plus importante de services s'appelle la « *servitization* » (Chen et al. 2021), que l'on francisera en « servitisation ». On parle là bien d'un processus, car cette réorientation stratégique demande des ressources, de la réflexion et pour ainsi dire du temps ; l'entreprise en cours de servitisation fait l'objet de changements organisationnels à la fois continus et discontinus (Chen et al. 2021). La servitisation est l'occasion d'entériner une relation client à long-terme et de rendre le client dépendant de l'entreprise qui l'assiste, au sens où il dépend du service qui lui est fourni, pleinement intégré dans ses propres processus industriels (Vendrell-Herrero et Bustinza 2020). En Europe, elle s'inscrit dans une dynamique où la production industrielle contribue de moins en moins aux métriques économiques et où, à l'inverse, l'économie des services est florissante (Vendrell-Herrero et Bustinza 2020).

L'IA comme service

Les systèmes d'IA peuvent pleinement s'intégrer à une stratégie de servitisation. Pour fonctionner pleinement, ces systèmes nécessitent d'être entraînés sur des jeux de données adaptés. Or, les constituer prend du temps. Ce qui sonne d'emblée comme une contrainte permet en réalité d'envisager le déploiement progressif de l'IA comme un processus « d'amélioration continue » (Bessant et Francis 1999). L'amélioration continue se définit comme un processus de changements incrémentaux et ciblés à l'échelle d'une organisation productive. Le terme ici est ambigu : ce qui est à améliorer du point de vue de l'entreprise vendeuse, c'est d'abord le système d'IA (qu'elle fournit) en lui-même. Mais du côté de l'entreprise acheteuse, cette amélioration du système peut également s'inscrire dans une démarche plus générale d'amélioration continue au sens organisationnel, héritée du modèle industriel japonais (Brunet et New 2003), en visant une meilleure qualité et une meilleure efficacité du travail. Quoi qu'il en soit, un système d'IA étant rarement une solution technique prête à l'emploi, son intégration sur le temps long dans l'organisation est l'occasion pour l'entreprise de transformer un produit (équipement, logiciel) en produit-service[197] (équipement, logiciel, outillés par des méthodes d'apprentissage machine). Ce passage d'une économie de produits vers une économie de services est le marqueur d'un autre processus à

[195] Ce paradigme fait suite à celui d'une « customisation de masse » où la conception de produits se base sur les principes de modularité et sur une intégration des clients dans le processus de design, au sens où ils sont libres de choisir les fonctionnalités qui leur servent ou non (Kumar 2007).

[196] Il ne s'agit pas d'envisager, dans la tradition de la sociologie des techniques, un nouveau design dans l'usage, au sens où l'utilisateur s'éloignerait du « script d'usage » pensé en amont (Akrich 1987). Des fonctionnalités neuves, différentes de ce qu'incluait le design initial, peut être intégrées à un dispositif à distance, grâce à la connexion au réseau par lequel il peut être mis à jour.

[197] Nous n'évoquons pas ici les possibilités d'utiliser l'IA pour concevoir une offre de services adaptée sur le plan mercatique. Les systèmes d'IA sont, dans cette optique, l'un des moyens pour enclencher la servitisation, plutôt que les objets concernés par ces nouveaux services (Abou-Foul, Ruiz-Alba, et López-Tenorio 2023).

l'œuvre, celui de la plateformisation de l'industrie, au cours duquel des entreprises non-plateformes reprennent les principes de fonctionnement des plateformes (Greenan et al. 2023).

La servitisation en pratique

L'entreprise Mecanex produit des équipements pour la salle blanche. Elle figure parmi les leaders du domaine en termes de chiffre d'affaires. Cette entreprise est relativement dépendante de l'industrie de la micro-électronique, qui constitue son principal client. La concurrence est importante dans un secteur où peu de firmes se partagent l'essentiel du marché, d'autant que, dans la salle blanche, les équipementiers sont directement mis en concurrence : l'entreprise SemiCorp n'a pas de fournisseur unique pour ces équipements. Mecanex cherche donc à se démarquer, à évoluer pour satisfaire les desiderata de ses clients :

> « Aller vendre un service additionnel qui permet au client de garantir la fluidité de sa production en salle blanche, ça, c'est générateur de beaucoup de valeur. »
>
> *Responsable Innovation chez Mecanex, entretien*

Le raisonnement en termes de valeur montre l'attachement d'une entreprise comme Mecanex à satisfaire ses clients et à leur apporter un avantage compétitif. Nous avons pu constater que les enquêtées concevaient la survie de leur entreprise au travers d'une intégration pleine et entière dans la stratégie propre de leurs clients. En ce sens, l'intérêt de la servitisation est également comptable :

> « Toutes les industries sont en train de s'orienter vers des modèles de souscription pour finalement assoir un revenu et garantir la pérennité des structures, dégager aussi des flux de trésorerie un peu plus constants. Mais le modèle n'est pas encore établi, dans notre cas, parce qu'on a encore cet ancrage très fort en tant que fournisseur de produits. Et la logique d'un fournisseur de produits, c'est de vendre, éventuellement d'assurer la maintenance de l'équipement, mais on vend, l'équipement est vendu, et il devient la propriété de l'entreprise qui l'utilise. »
>
> *Responsable Innovation chez Mecanex, entretien*

D'après le responsable de l'équipe dédiée au logiciel embarqué, l'ajout de nouvelles fonctionnalités constitue l'essentiel du travail de support informatique (le reste étant dédié à la correction de bugs). La culture du service est donc déjà bien ancrée au sein de l'entreprise. Qu'il s'agisse d'IA ou d'autres types de programmes, l'amélioration des dispositifs se base sur une boucle de rétroaction : les utilisateurs font leurs retours (des « *feedback* »), puis les concepteurs font des propositions techniques, qui appellent à de nouveaux retours. Mais l'intégration de systèmes d'IA qui procèdent à de l'analyse de données d'équipements de production révèle des contraintes liées à la confidentialité des données. En effet, les données relatives au fonctionnement des équipements fournissent des informations concernant les processus industriels : quand l'équipement tourne, c'est que la production tourne. Ces données renseignent donc sur la production de l'entreprise SemiCorp en termes quantitatifs (*si l'équipement fonctionne à telle puissance sur telle durée, c'est que l'entreprise produit telle quantité de produits*). Or, ces informations peuvent donner des indications sur l'activité de l'entreprise, et donc aider à l'estimation

de sa performance financière. Cela pose un problème, car les entreprises cotées en bourse sont soumises à des règles très précises vis-à-vis de leur communication financière, de façon à éviter des stratégies opportunistes assimilables à des délits d'initié. Autrement dit, les données issues des équipements constituent autant une opportunité pour optimiser le processus industriel, qu'un risque de compromettre SemiCorp. C'est ce qu'explique cet enquêté :

> « Tout ce qui constitue l'offre tout venant, on va dire, des choses qui sont vraiment diffusées à très, très large échelle, qu'on va retrouver, par exemple, dans des composants pour l'industrie automobile, il y a une très grande compétition sur les prix. Et donc, ils attendent, avant d'investir de nouveau, que la demande supplante l'offre pour ne pas tirer les prix vers le bas. Donc, la question du volume produit, c'est super sensible. Or, dans les données que nous manipulons, si on avait accès à tout en temps réel, […] on n'aurait aucune certitude sur le volume exact, mais on aurait quand même de grandes indications sur les volumes produits. Et donc, ça, c'est une donnée qui drive beaucoup la logique d'investissement dans le monde du semiconducteur. »
>
> *Responsable Innovation chez Mecanex, entretien*

Chez Mecanex, la quasi-totalité des enquêtés ont évoqué ce sujet comme étant un point crucial dans la relation avec l'entreprise SemiCorp. Ils insistent sur la nécessité d'établir une relation de confiance avec leurs clients. Cela passe notamment par l'envoi de salariés sur place, qui rentrent rarement au siège de Mecanex, et sont chargés de transmettre les données et de maintenir les équipements. Cette transmission de données ne s'effectue que dans des cas très particuliers :

> « Nous on reçoit pas [les données] à Mecanex, c'est traité au niveau local. Il y a très très peu de liens entre les équipements chez les clients et Mecanex. Il y a vraiment une clôture, une séparation des réseaux. C'est très dur d'y avoir accès. Il y a que très peu d'équipements… alors il y a des accords forts pour avoir accès aux données des équipements à l'extérieur. [Le responsable du projet Maintenance Prédictive] dans le cadre de ses recherches, oui il a accès à certains équipements, mais c'est très très très rare. »
>
> *Ingénieur Logiciel chez Mecanex, entretien*

Dans ce cas de figure, l'innovation technique répond ainsi à une contrainte de sécurité[198]. Le service de maintenance prédictive apporté par Mecanex embarque avec lui un service tout aussi précieux aux yeux de son client : celui de l'assurance d'une sécurité économique.

[198] Cela étant dit, il serait intéressant de conduire des recherches sur les transformations organisationnelles liées à ces technologies encore émergentes. Ne pouvant être mises à jour qu'en réseau local, elles nécessitent de faire venir les ingénieurs sur les sites de production, ce qui participerait à rapprocher des communautés professionnelles que la numérisation, jusqu'à présent, avait plutôt tendance à mettre à distance.

3.b. Envisager les modalités du changement sous le prisme du récit du renouveau industriel

Pour les enquêtés que nous avons rencontré, les discours relevant de la transformation de l'industrie sont indissociables de l'IA, non pas que le sujet les obsède, mais plutôt parce que nous les avons rencontrés précisément au cours de projets de déploiement de systèmes d'IA. Ces projets matérialisent, concrétisent des transformations qui sont en cours, parce qu'ils s'inscrivent dans leurs agendas, font l'objet de travaux techniques, de réunions, qui peuvent demander des prises de position. En d'autres termes, en nous parlant d'IA, les enquêtés parlent parfois, plus largement, d'innovation technologique.

Pour rappel, nous avions précédemment montré que le récit du renouveau industriel se caractérisait par trois motifs discursifs ayant trait à la temporalité du changement : inéluctabilité, disruptivité, grande époque, voir (**I.**1.d). Qu'en est-il véritablement ? Pour le comprendre, nous nous proposons de mettre en regard ces éléments de discours avec la position affichée des enquêtés. Cette sous-section est divisée en trois parties : chacune d'entre elle s'attache à comparer un motif discursif avec les positions des enquêtés. Nous verrons que dans chacune d'elles, les perceptions des transformations de l'industries sont irrémédiablement intriquées avec les promesses de l'IA sur le plan économique, et plus particulièrement celles qui ont trait à la garantie de la survie des entreprises (**I.**2.b).

Inéluctabilité ? Le changement comme une loi de la nature

Les propos recueillis semblent d'abord montrer que l'adoption des nouvelles technologies apparaît dans la droite ligne des choses, elle est logique, implacable. La plupart des enquêtés, chacun à leur manière, ont intériorisé le principe d'une nécessité de l'innovation technologique. Au-delà de toute considération normative, c'est l'absence d'alternative qui guide l'action.

> « Des gens… on ne va pas pouvoir les emmener sur d'autres missions, c'est des profils qui vont être différents. […] Et ça oui, le changement va être brutal. Mais malheureusement il n'y a pas de voie B. »
>
> *Ingénieur Modélisation chez Mecanex, entretien*

Après lui avoir demandé de clarifier sa pensée, l'enquêté fait alors référence à la théorie de l'évolution de C. Darwin[199]. Dans une transposition économiste de l'énoncé darwiniste, il suggère que ce dernier s'appliquerait aux entreprises tout comme aux salariés, qui doivent survivre face à un avenir incertain qui pourrait bousculer leurs habitudes organisationnelles. Au fond, de ce point de vue, ce seraient les contraintes économiques qui pèsent sur les entreprises qui les forceraient à adopter certaines technologies, perçues comme un avantage compétitif. Ce discours est marqué par les prémisses de l'économie évolutionniste, une branche de l'économie qui considère le comportement des entreprises et

[199] En l'occurrence, c'est le mécanisme de sélection naturelle, présenté par C. Darwin ([1859] 2009) au milieu du XIXème siècle, qui sert de support à l'analogie. Dans la nature, explique C. Darwin, ce sont les individus les mieux adaptés à leur environnement qui survivent, et qui transmettent, par suite, leurs attributs à leurs descendants. L'exemple typique est celui des girafes, dont on peut imaginer qu'il aurait permis aux premiers spécimens dotés de cous plus longs d'atteindre les feuilles hautes des acacias et de mieux se nourrir que les autres.

des marchés à l'aune des théories de la sélection naturelle (Nelson et Winter 1982). La théorie macroscopique devient en ce sens une justification pour le comportement à suivre.

Les processus d'adoption des technologies sont en fait pleinement associés à des mécanismes déterministes, tout du moins régis par des modèles standards. Un autre enquêté s'appuie par exemple sur les « courbes en S » pour expliquer le sens de l'évolution des technologies. Ces courbes font écho aux travaux d'E. Rogers ([1962] 1995). Il y décrit le processus de « diffusion des innovations » et présente plusieurs facteurs qui sont supposés exercer une influence sur l'adoption. Ceux-ci sont liés à des caractéristiques techniques propres à l'innovation et à son rapport avec la société dans laquelle elle s'intègre : compatibilité avec un système de valeurs existant, observabilité de ses fonctionnalités, simplicité d'usage, qualité par rapport aux alternatives, possibilité d'un essai avant achat.

Dans son livre, E. Rogers esquisse un modèle gaussien de l'adoption des technologies, voir (Figure 34). Les différents types d'adoptants sont catégorisés en fonction de la date à laquelle ils implémentent une nouvelle technologie dans leur organisation. Il y a les innovateurs pionniers, les utilisateurs précoces (*early adopters*), la majorité précoce (*early majority*), la majorité tardive (*late majority*) et les traînards[200] (*laggards*). On peut construire une courbe de Gauss qui donne en pourcentage le taux d'adoption en fonction du temps : la courbe en forme de S se construit par suite en cumulant les quantités d'adoptants. Cette catégorisation est celle d'idéaux-types : elle n'a pas pour objet de classifier de façon rigide et rigoureuse les individus. Néanmoins, on retrouve dans la description d'E. Rogers des valeurs et caractéristiques typiques de chaque classe d'individus. Pour ce qui concerne les personnes les plus à même de retarder l'adoption de la technologie (les « traînards »), la connotation est largement négative. Dans le champ de l'industrie, certains profils sont ainsi considérés comme inflexibles, à convaincre. Une réaction négative à un projet de changement technologique serait la conséquence de traits de

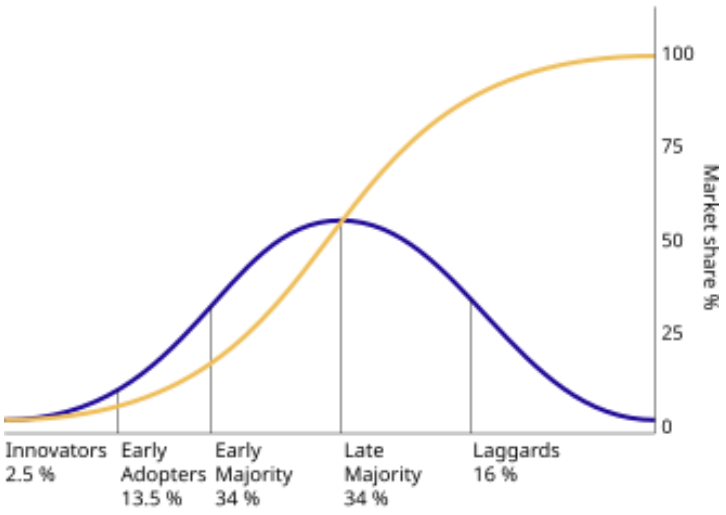


Figure 34 : Modèle d'adoption des technologies par Rogers ([1962] 1995). La courbe bleue représente le nombre d'adoptions actuel en fonction du temps, tandis que la courbe jaune représente la somme des adoptants en fonction du temps.

[200] La traduction « traînard » est plus adaptée que « retardataire », et la connotation est délibérément péjorative. Rogers se défausse de tout jugement de valeur, et explique que cette teinte négative est surtout due au fait que les communautés touchées par les innovations ont-elles-même un fort biais en faveur de l'innovation, qui les amène à déconsidérer celles qui s'y intéressent moins (Rogers [1962] 1995:206).

personnalité particuliers, ou d'un défaut de communication face à un profil de ce type. L'intérêt du projet en lui-même pour les salariés est faiblement questionné sous ce prisme. Les modèles de conduite du changement abordant la notion de « résistance au changement » ont également contribué à normaliser et naturaliser les réticences des salariés[201]. Ils ont bien ancré chez nos enquêtés l'idée d'une psychologisation des refus.

Un autre élément conçu comme faisant partie intégrante du processus de déploiement technologique est la réaction des salariés face aux technologies qui leur seront présentées. Plusieurs enquêtés mentionnent en particulier la possibilité que le déploiement de la technologie puisse générer une forme d'anxiété. L'entreprise se tient prête à accueillir et accompagner ce mal-être, comme l'indique ce responsable :

> « En fin de compte, je pense que l'anxiété, c'est au regard d'une sécurité émotionnelle. C'est quelque chose qu'on doit accepter sur le lieu de travail, je pense, qu'il y ait ce genre d'émotions et ce genre de choses, et je pense que les gens devraient pouvoir être écoutés sur ce sujet et pouvoir parler de ce genre de choses. Parce que c'est le début, vous savez, parler d'une anxiété ou d'une peur est le début de la phase de déni pour aller vers la phase suivante : qu'est-ce qu'on fait maintenant qu'on a ça ? [...] Peut-être qu'on doit faire avec ce genre de technologie, n'est-ce pas ? Donc je dirais que c'est ce que le management peut faire pour offrir un cadre adéquat pour la sécurité émotionnelle des gens impliqués dans ce genre de choses. »
>
> *Directeur de l'innovation chez Mecanex, entretien en visio-conférence, notre traduction*[202]

Ce témoignage apparaît compatissant et empathique. Il est malgré tout révélateur d'une normalisation de la possibilité que le déploiement technologique soit une souffrance. Ce n'est pas seulement l'intégration des technologies qui se trouve jugée inéluctable, c'est également la réaction qu'elle va susciter. Tout est ainsi pensé comme si les salariés devaient nécessairement subir les conséquences (et notamment émotionnelles) de transformations organisationnelles les concernant. En cela, la référence au déni rappelle directement les cinq étapes du deuil, selon le modèle élaboré par la psychologue E. Kübler-Ross (1975). L'expérience du deuil, évoquée par une autre personne interrogée, peut surprendre. Quelle analogie pourrait permettre de relier deuil et changement organisationnel ? Cet isomorphisme est l'héritier d'une longue lignée de modèles de réaction face au changement, qui ont étendu des postures individuelles (le deuil d'une personne face à la perte d'un être cher) vers des considérations plus collectives (la conduite du changement en entreprise) (Elrod et Tippett 2002). Ce glissement conceptuel

---

201 Voir par exemple le manuel *Le pilotage du changement* (Collerette, Lauzier, et Schneider 2021) dont A.-M. Duclos (2015) examine de façon critique les ramifications en termes de résistance au changement dans le secteur de l'éducation.

202 Transcription originale en anglais : « Well, I think that anxiety is about emotional safetiness at the end of the day. So, I think this should be something that we have to accept in the workplace, that there are these kind of emotions and there are these kind of things, and I think that people should be able to be vocal about this and talk about these kind of things, right? Because this is the beginning, you know, talking about an anxiety or a fear is the beginning of the denial phase to go into the next phase, okay, what do we do with this now? Because it is here and it is not going to go somewhere else anytime soon. So maybe we need to deal with this kind of technology, right? So I would say this is what management can do to offer a proper framework for emotional safetiness of people involved in these kind of things. »

a pu susciter quelques critiques portant notamment sur les différences catégoriques d'expérience vécues entre ces deux situations relativement distinctes (Pailot 2014)[203].

On peut ainsi faire le constat d'une importante prégnance, au moins dans cette entreprise, d'une épistémologie naturaliste[204]. Elle fait appréhender mais aussi justifier le déploiement technologique non seulement par la poursuite d'objectifs économiques, mais aussi par une rhétorique de la nécessité. Cette nécessité ici est double : il y a d'abord la nécessité au sens commun d'une action prise pour assurer la compétitivité (et la survie) de l'entreprise ; il y a ensuite la nécessité causale, platonicienne[205], qui tient de mécanismes macroscopiques indépassables, au sens où il ne pourrait en être autrement. D'une certaine façon, ce cadrage permet de ne pas remettre en question le choix opéré par l'organisation[206]. Sur la forme, on retrouve ici des éléments du déterminisme justificatoire que l'on a pu souligner au début du premier chapitre. Pour autant, dans le contenu, ce ne sont pas obligatoirement les mêmes arguments qui sont repris : la loi de Moore, par exemple, n'a pas été évoquée par les enquêtés, ni l'idée d'une exponentialité du progrès technologique[207]. De façon générale, le monde industriel semble assez peu perméable aux arguments singularitaristes.

Disruptivité ? L'inertie d'un déploiement progressif

Il ne fait aucun doute pour les enquêtés de Mecanex que l'IA sera amenée à s'y développer, même sous des formes qui ne sont pas encore connues. En fait, le secteur de l'industrie est coutumier de ces innovations récurrentes qui amène à constamment réenvisager les procédures de travail, de production, de décision, afin de les rendre plus performantes. Dans le cas de l'IA, il n'est pas rare que la technologie précède le cas d'usage, et que la solution précède le problème (qu'il s'agit alors de chercher). Plusieurs enquêtés rappellent qu'ils ont déjà vécu des changements technologiques, et qu'ils sont en outre, déjà habitués à l'usage d'algorithmes. Le déploiement de l'IA se place ainsi dans une trajectoire de continuité du point de vue des responsables d'équipe.

> « On vient du domaine de la mécanique, on a eu l'habitude d'avoir des capteurs, d'exploiter des données. Et là sont mises à dispositions des nouvelles générations de capteurs, des nouvelles capacités de calcul, on est en train de passer de l'Excel à un système qui se débrouille tout seul

[203] P. Pailot (2014:17) écrit : « Au-delà de son irréversibilité, une autre caractéristique de la perte dans un processus de deuil est son caractère subi ou imposé par la vie […]. [L']application de la notion de deuil aux changements professionnels opérés de manière volontaire ou aux transitions parfaitement prévisibles ou anticipées apparaît pour le moins discutable sur le plan théorique. »

[204] A ne pas confondre avec le naturalisme littéraire de Flaubert ! « Du point de vue épistémologique », écrit Louis Quéré (2001:275), « le naturalisme consiste à soutenir que la démarche pratiquée dans les sciences de la nature fournit le modèle de l'enquête scientifique, et que si les sciences de l'homme et de la société entendent être de véritables sciences, elles doivent adopter cette démarche; la société doit pouvoir être étudiée de la même façon que la nature et il n'y a pas de raison de soutenir qu'une étude naturaliste de la société est impossible. »

[205] Le propos de Platon sur la nécessité et la cause est développé dans le *Timée*.

[206] Ce qui n'empêche pas d'engager une réflexion de fond sur la manière de le mettre en œuvre, comme nous l'avons observé à divers degrés sur nos terrains d'enquête.

[207] Bien que la plupart des enquêtés soient allés sur ce terrain, les entretiens ne portaient pas spécialement sur les dynamiques du changement. Il est possible que l'absence de certaines thématiques du discours se justifie ainsi par le fait qu'il ne s'agissait pas du thème de la discussion *a priori*.

[…]. Et donc ces phases-là il y a finalement une continuité dans notre domaine, c'est juste un outil différent. »

Responsable du projet Maintenance Prédictive chez Mecanex, entretien

Le prisme de la continuité n'empêche pas d'envisager des changements organisationnels conséquents[208]. Mais le temps que demande la mise en place de ces projets d'IA (qui se compte en mois voire en années pour les cas que nous avons observés) ne peut qu'affaiblir l'idée d'une disruptivité ou d'un changement brusque associée à l'implémentation de cette technologie :

« Pour les entreprises qui n'ont pas une tradition de l'investissement dans la qualité des données, dans les structures de données, […] et toutes ces choses très importantes qui sont nécessaires pour utiliser cette technologie, c'est une transformation longue et à long-terme […]. C'est la raison pour laquelle l'engouement ne se vérifie pas aussi vite qu'il le devrait, parce que, bien sûr, derrière cela vous avez des vieilles entreprises, des vieilles organisations qui ne sont pas habituées à ce genre d'outils. »

Directeur de l'innovation chez Mecanex, entretien en visio-conférence, notre traduction[209]

L'inertie qui caractérise les organisations – et ce, indépendamment de leur taille (Kelly et Amburgey 1991) – ne peut que faire envisager des transformations sur le temps long. Cette « inertie structurelle » peut se définir comme un ensemble de forces qui ralentissent la réorganisation d'une organisation qui fait face à un changement d'environnement ou un climat d'incertitude (Hannan et Freeman 1984)[210]. Dans leur revue de la littérature concernant l'IA dans les organisations publiques, M. Cuillerier et ses collègues (2023) ont identifié un certain nombre de facteurs qui peuvent expliquer cette inertie. Parmi ceux-ci, plusieurs sont également évoqués par nos enquêtés. D'abord, un manque de ressources ou de savoirs organisationnels (il n'y a pas ou peu d'expertise autour de l'IA en interne) est diagnostiqué :

« Donc on n'a pas… on est encore très déficitaire sur le plan des compétences. On a deux, allez trois personnes dans le groupe entre [site A de Mecanex] et [site B de Mecanex] qui sont compétentes dans ce domaine, ce qui est très insuffisant pour notre taille de structure. Donc on développe et on s'appuie, on cherche à développer ces ressources et on s'appuie aussi

[208] Du point de vue de l'équipe de Mecanex que nous avons pu rencontrer, les entretiens ont également été l'occasion de soulever des problématiques de sorte à les conscientiser et à en faire des sujets de discussion en interne.

[209] Transcription originale en anglais : « And, you know, for companies that traditionally have not invested that much in the data quality, data structure, data classification, the semantics of the data, and all these kind of very important things that are required to use this technology, then it is a long-term and a long transformation to be able to tap into the power of using data for doing this kind of businesses. So that's the reason why, you know, the hype is not delivering as fast as it should, because, of course, behind that you have legacy companies, you have legacy organizations that are not used to use these kind of tools, and you need to make the preparations, and you need to have your processes streamlined in order to use these kind of technologies, right? »

[210] L'inertie structurelle peut être considérée de façon relative : les auteurs font justement référence à l'industrie de la micro-électronique. Elle est jugée si dynamique sur le plan du potentiel de réorganisation, que des entreprises d'autres secteurs, considérées très aptes à se remodeler et à s'adapter à des modifications extrinsèques, seraient jugées très inertes par rapport aux firmes de l'industrie du semiconducteur (Hannan et Freeman 1984:151).

beaucoup sur des partenaires extérieurs. […] On a été jusqu'à maintenant plutôt dans une logique d'acquisition de briques, de solutions sur étagère plutôt que de développement par nous-mêmes de notre propre solution. »

Responsable Innovation chez Mecanex, entretien

Une autre difficulté relevée par M. Cuillerier relève de l'estimation des bénéfices qui pourraient être retirés de l'IA. Chez nos enquêtés, le processus de la construction de la preuve est central. Il s'agit de prouver aux clients, mais aussi à la hiérarchie et en fait, à soi-même, que le dispositif sera bien utile. Cette utilité perçue permet de justifier les investissements (aussi bien en temps qu'en argent) dans le déploiement généralisé de la nouvelle technologie.

« Tu as obligatoirement une nouvelle intelligence qui vient se greffer, parce qu'on va dire que, avant que nous on les intègre dans nos équipements, […] il faudra déjà qu'on prouve sur le terrain que ça fonctionne. Et puis quand on prouve que ça fonctionne, il faudra qu'on prouve qu'il y a beaucoup de clients qui le veulent. »

Ingénieur Chimie chez Mecanex, entretien

Les anticipations soulignent la réalisation que le déploiement technologique ne peut être ni immédiat ni généralisé, car il existe une demande importante de preuve aussi bien de la part des clients que de la hiérarchie. La construction de cette preuve prend du temps, et doit déjouer les risques perçus par les autres acteurs. En cela la promesse d'un changement important dans l'organisation reste conditionnée à des facteurs liés à sa mise à l'épreuve, à son expérimentation, qui relèvent non pas de sa représentation *a priori* mais de son application concrète.

Si le qualificatif « d'inertie » peut paraître péjoratif en tant qu'il qualifie d'une certaine façon la lenteur d'une entreprise dans son adaptation au changement, il ne doit en réalité pas revêtir un aspect normatif. Face à une technologie annoncée comme fortement transformatrice, l'équipe chargée du déploiement du dispositif d'IA prend le temps de la réflexion. Ce faisant, la technologie perd en réalité son caractère disruptif (au sens d'une rupture brusque avec l'existant) puisque le changement se trouve être accompagné dans la durée. D'une certaine façon, c'est précisément parce que la représentation des systèmes d'IA est auréolée d'un halo transformateur, profondément déterministe, qu'elle peut entraîner une réaction de prudence, d'inertie, et donc une perte de disruptivité[211]. La prophétie n'est plus auto-réalisatrice, mais auto-annulatrice. L'honnêteté doit nous forcer à préciser, malgré tout, que si nous observons cette prise de recul à Mecanex, elle n'est pas systématique. La réaction organisationnelle aux promesses de l'IA dépend de facteurs que cette étude ne peut pleinement mesurer.

[211] Une technologie peut être disruptive même si elle met du temps à être conçue. Ce que nous voulons souligner ici, c'est que les précautions à l'égard d'une technologie annoncée comme disruptive encouragent un déploiement progressif, qui vient s'inscrire petit à petit dans l'organisation, de sorte que les changements s'observent sur le long-terme à mesure de la place donnée au système.

Grande époque ? Un débat sur la vitesse de l'innovation

Le dernier motif sur laquelle sous souhaitons nous attarder est celui de la grande époque. La période est-elle véritablement charnière, au sens où elle demanderait une prise de décisions appliquée et rapide concernant le déploiement de systèmes d'IA ? Chez Mecanex, les avis sont partagés. Le constat général reste celui de la nécessité d'une adaptation aux transformations liées au numérique et à l'IA, comme nous l'avons souligné au début de cette sous-section. Il n'y a pas de remise en question de l'expérimentation de ces dispositifs dans le travail : l'introduction de ces technologies n'est, selon les dires de nos enquêtés, pas contestée. Cette expérimentation se prolonge sur la durée, et se conçoit dans un contexte d'une expertise existante limitée en IA :

> « On a expérimenté plusieurs voies et on commence à disposer d'outils qui nous permettent vraiment d'abord d'être autonomes sur nos choix, et puis de pouvoir créer des démonstrateurs sur le terrain, l'objectif étant d'avoir un retour déjà de ces technologies et de leur mise en application chez nos clients, le plus rapidement possible, de comprendre un petit peu tous les ressorts qui tournent autour de ces outils, de leur impact chez nos clients, chez nous aussi. »
>
> *Responsable du projet Maintenance prédictive chez Mecanex, entretien*

Les avis divergent en fait sur les modalités de cette expérimentation, et sur ce qu'on pourrait appeler la « rapidité de l'innovation » (Kessler & Chakrabarti, 1996, *innovation speed* en anglais). Pour un enquêté en particulier, responsable support client, la collaboration de Mecanex avec ses clients devrait être plus proactive en ce qui concerne la mise au point d'innovations techniques. Selon lui, l'expérimentation devrait être généralisée, impliquer un maximum de clients intéressés, et sortir au plus vite du service de R&D :

> « Pour moi, il faudrait que ça, on arrive à le déployer bien plus rapidement […]. Enfin, si vous voulez, en amont, être beaucoup plus présent là-dessus. […] Nos gros donneurs d'ordre, ou, quelque part, les gens qui nous font des commandes, ce sont des *offline materials*, qui sont des machines qui vont dans le semi[-conducteur], […], ce sont tout un tas de constructeurs de machines, d'accord ? Pour moi, pour que, quelque part, cette entreprise soit numéro un mondial, il faut cette stratégie, et, en amont, il faut que l'on soit bien plus proche du centre R&D. Et ça, bah oui, c'est aussi un risque, quelque part. »
>
> *Responsable Support client chez Mecanex, entretien*

Au moment de notre enquête, des données destinées à l'entraînement sont transmises par un client, mais les prototypes de systèmes d'IA sont encore à l'étude en interne. La collaboration est amorcée, se traduit par cette transmission de données, mais ne donne pas lieu à un prototypage. L'enquêté déplore les limites de cette stratégie, qu'il associe à un clivage entre approches *à la française* et *à l'anglo-saxonne* :

> « Mais pour moi, si vous voulez, on a une approche... alors, je vais peut-être être raide, on a une approche plutôt franco-française. On devrait avoir une approche plutôt anglo-saxonne. La franco-française, c'est qu'on essaye, avec ceinture et bretelles, d'être sûr que ça marche. Parfois, il y a un petit peu d'incertitude dans tout ça. Et le client, il est prêt à en prendre le risque si, quelque

part, on le prévient et qu'on joue gagnant-gagnant. Franco-français, c'est ça, c'est "Je suis plein de normes. J'essaie d'aller au parfait. Et parfois, je n'y arrive pas." Et le projet dure 10 ans […]. [Les anglo-saxons] ils tentent. Ils tentent, mais ils préviennent le client en disant qu'il y a un risque. Et ils partagent le risque. Et là, je suis sûr, et je le sais, qu'ils sont plus avancés que nous sur le sujet. Puisqu'ils tentent, ils tentent, et quelque part, en tentant, justement, on a des retex[212], on a des produits qui défaillent, on n'y arrive pas. Clac ! Eh bien, on change, on fait évoluer le truc. Et nous, on attend que ce soit parfait et puis, on verra. Et là, à mon avis, oui, on a du retard. »

Responsable Support client chez Mecanex, entretien

Nous ne pouvons clairement infirmer ou confirmer la perception de l'enquêté concernant la vitesse de déploiement de l'innovation sur laquelle travaille les membres de l'entreprise. Nous n'avons pas cherché à la vérifier. Ce qui ressort en revanche, c'est une volonté d'action orientée vers la prise de risques, qui demande des décisions rapides. On retrouve ici l'idée d'une nécessité de déployer les technologies qui se double d'une nécessité de le faire vite.

L'analyse présentée par l'enquêté s'inscrit en outre dans une comparaison culturelle entre les approches à la française ou à l'anglo-saxonne. Celle-ci n'est pas étayée par la littérature à notre connaissance, mais fait référence à des arguments dénonçant une certaine faiblesse de l'innovation européenne vis-à-vis des Etats-Unis[213]. Ce positionnement jugé fâcheux permet d'accentuer la vision d'un retard de l'industrie européenne, et donc d'une nécessité d'agir vite. Retrouve-t-on le motif de la grande époque ? Ça n'est pas certain car, en pratique, cette course à l'innovation apparaît permanente dans le discours. Il ne s'agit pas spécialement d'innover *maintenant*, de déployer les technologies d'IA car elles sont requises pour avancer. Il s'agit plutôt d'innover *tout le temps*, de façon à rester compétitif.

Une porosité partielle des promesses du renouveau industriel

Nous avons montré que le discours des enquêtés n'était pas totalement imprégné du récit du renouveau industriel. Le caractère révolutionnaire des technologies d'IA n'est pas spécialement souligné, elles s'ajoutent à une lignée d'autres technologies existantes. En revanche, le déploiement des nouvelles technologies, IA en particulier, reste perçu comme inéluctable et nécessaire. Il est envisagé comme une condition nécessaire à la compétitivité économique de l'entreprise.

Les témoignages récoltés pointent plutôt vers l'idée que le récit de l'*Industrie 4.0* n'a pas pénétré l'entreprise en profondeur. Les prises de parole font plutôt référence à des théories économiques plus anciennes, associée à une littérature passée du champ scientifique vers le champ des affaires. En réalité, les motifs discursifs du récit de l'*Industrie 4.0* qui sont ici identifiables sont essentiellement des redites de thèmes qu'il n'avait fait que recycler. Le thème de l'inéluctabilité de l'innovation, en ce sens, poursuit celui de l'inéluctabilité linéaire du progrès, malgré l'opposition qui existe entre ces deux notions. « [La] condition

[212] Retours d'expérience.

[213] En témoigne la petite phrase attribuée à Emma Marcegaglia, ancienne présidente de BusinessEurope (un lobby d'entreprises à l'échelle européenne) : « Lorsqu'il y a une innovation, les Américains en font un commerce. Les Chinois, une copie. Les Européens, quant à nous (en la matière, je nous mets volontiers dans le même panier), nous en faisons un règlement » (Nantermod 2018).

de possibilité [de la diffusion de l'innovation], sur le plan philosophique », écrit T. Ménissier (2021:31), « réside dans la conviction de l'innovateur que son action est mue par le destin, c'est-à-dire qu'elle confond en un enchainement inéluctable les vicissitudes de l'histoire, sa propre vision et les efforts de sa volonté. » Mais comme nous le verrons dans la suite de cette section, la volonté de ces innovateurs peut tout de même se doubler d'une préoccupation pour les limites des technologies d'IA et pour les conséquences qu'elles pourraient avoir sur l'organisation.

3.c. Quel statut pour l'IA dans l'écosystème technique ?

Qu'en est-il des promesses propres à l'IA ? Quelle perception les enquêtés en ont-ils ? C'est ce que nous nous proposons d'examiner dans les lignes à suivre. Nous reviendrons pour cela, en lien direct avec la sous-section (**I.**2.a), sur les promesses en termes techniques qui concernent la supériorité prétendue du système technique sur l'humain.

Le refus de l'objet magique

> « Il y a pas de magie hein. Sauf que voilà aujourd'hui, le mécanisme se produit à une telle vitesse on va dire que forcément, c'est magique quoi. L'objet qui apparaît de manière instantanée "Ah ouais super il a répondu en quelques secondes mais comment il fait ?" Bah ouais des milliers de calculs à la seconde, ça c'est apporté par des nouvelles technos, ces capacités de calcul phénoménales, qu'on trouvait historiquement sur des gros micro-processeurs, des gros Intel etc. avec beaucoup de mémoire. Les dernières générations sont capables de mettre ça sur ce qu'on appelle des microcontrôleurs […]. Il faut démystifier cette partie-là. »
>
> *Responsable du projet Maintenance prédictive chez Mecanex, entretien*

Les enquêtés ont bien conscience des limites des systèmes qui leur sont présentés. Ce n'est pas la première fois qu'une technologie apparaît dans l'écosystème déjà fortement technicisé dans lequel ils travaillent. Dans le but de comprendre ces nouvelles méthodes, ils les expérimentent, les testent, les mettent à l'épreuve :

> « C'est que… au début, je me disais, "C'est magique, on va y arriver." Mais, j'ai commencé à jouer avec les statistiques, et je me suis vite aperçu du nombre de scénarios et le volume de données qu'il fallait pour faire apprendre ce matériel-là. Et j'ai assez vite compris qu'on n'y arriverait jamais. »
>
> *Ingénieur Modélisation chez Mecanex, entretien*

Quand le terme de « magie » est utilisé par nos enquêtés, c'est systématiquement de façon négative. Dans un monde industriel où l'organisation cherche à maîtriser l'incertitude au maximum, la place ne peut être laissée au merveilleux et ses aléas. La bascule vers le « déterminisme enchanté », décrit par A. Campolo et K. Crawford (2020), n'est ainsi pas pleinement enclenchée – ou alors, elle est rapidement désactivée par de premiers essais.

A ce titre, le terme d'*intelligence artificielle* fait presque systématiquement tiquer les enquêtés qui se montrent dubitatifs du caractère « intelligent » de ces dispositifs. Certains préfèrent par exemple parler « d'algorithmes » voire « d'algorithmes auto-adaptatifs ». Dans ce refus de l'expression « intelligence artificielle », on retrouve la critique internaliste de l'ingénieur L. Julia, concrétisée dans son ouvrage au titre évocateur, *L'intelligence artificielle n'existe pas* (Julia et Khayat 2019). Cette remise en perspective du terme s'associe à une insistance sur la division entre « arènes normatives » bien délimitées (Benbouzid et al. 2022). Les professionnels se montrent gênés, voire agacés, d'une comparaison entre système algorithmique, calculatoire, statistique d'un côté, et intelligence vue dans son caractère organique, réflexif, raisonnant de l'autre. Cela n'empêche pas les enquêtés d'avoir un certain nombre

d'attentes vis-à-vis des aptitudes des systèmes d'IA. Ce qu'espèrent en particulier les ingénieurs que nous avons rencontrés, c'est de capitaliser sur la possibilité pour les systèmes d'IA d'apprendre sur des données existantes :

> « En fait, comme là on est encore au début du projet… je pense qu'à terme oui on aura un peu une automatisation de tâches. Dans le sens où une fois qu'on aura confiance, on aura créé la confiance et on aura une réponse fiable, je sais pas moi, 90, 98, 99%, je sais pas quel est le seuil d'acceptabilité qui a été fixé. »
>
> *Ingénieure Support chez Mecanex sur site client, entretien en visioconférence*

Le système d'IA est considéré comme détenteur d'une certaine marge de progression qui sera amenée à évoluer dans un sens positif. Sa correction doit croître pour atteindre des niveaux de fiabilité qui pourront justifier une mise en pratique généralisée. Car du point de vue des enquêtés les plus éloignés de l'usage concret du système, la confiance, c'est la performance, et la quête de la fiabilité est un objectif à atteindre, mais surtout un objectif considéré comme atteignable. Cela requiert un travail de préparation conséquent :

> « Et c'est ce que je vous mentionnais comme étant le véritable challenge. Comment est-ce que j'organise les données de sorte à ce que je les rende exploitables par ces agents [= les systèmes d'IA] pour qu'ils puissent précisément faire ce qu'on s'attend à ce qu'ils fassent ? Et c'est quelque chose qui à ce stade est un effort de chaque instant. »
>
> *Directeur de l'innovation chez Mecanex, entretien en visio-conférence, notre traduction*[214]

L'attention portée au travail préalable d'organisation de la connaissance est rendue tangible au sens où le projet de maintenance prédictive, encore balbutiant, n'est pas encore matérialisé sous la forme d'un logiciel, d'une interface utilisable. Le travail fourni pour le moment est ainsi un travail de préparation, d'étude, lors duquel ce sont les données mêmes qui sont analysées, ordonnancées. C'est un point notable au sens où les sciences sociales ont opéré une critique importante de l'invisibilisation de ce travail de la donnée, parfois délibérée et stratégique (Carrigan, Green, et Rahman-Davies 2021). Il est possible qu'une fois le système déployé et stabilisé, cette partie du travail soit peu à peu ignorée ; possible mais pas nécessaire, car l'actualisation du système peut demander à revenir sur ce qui avait déjà été établi techniquement.

Le biais comme source d'erreur

Malgré ce travail important de façonnement de la donnée, les questions d'objectivité ne se posent pas sur le plan d'une comparaison humain-machine. En réalité, la physique des équipements produits par Mecanex est bien connue, modélisée : elle est complexe mais stable et indiscutée. La question du biais

[214] Transcription originale en anglais : « And that's where I was mentioning to you that that's the real challenge. How do I organize the data in such a way that I can make it searchable and findable by these agents so that they can precisely find what we are expecting them to do, and this is something, you know, that it is an ongoing effort at this point. »

ne se pose ainsi pas au niveau de l'annotation des données, mais plutôt sur le plan de la généralisation des modèles qui utiliseraient ces données :

> « La notion de biais elle intervient beaucoup, suivant les jeux de données qu'on a utilisés pour l'entraînement, on peut potentiellement tomber sur des biais, et à ce moment-là nous faut qu'on les identifie assez rapidement. En disant "Bah oui, peut-être que les jeux d'entraînement ils étaient […] pas finalement les meilleurs", du coup on se rend compte que sur telle catégorie de machines plutôt qu'une autre on a des meilleurs résultats. Bah oui on vient de comprendre que le jeu d'entraînement avait été plutôt sur ce type de machines plutôt que l'autre par exemple. Ça faut être en mesure de le déterminer rapidement aussi. […] Là, dans notre domaine à nous, on est typiquement dans la sélection des jeux d'entraînement, pour que finalement on privilégie pas… qu'il y ait pas des modèles qui soient trop portés sur un type de machine plutôt qu'une autre. »
>
> *Responsable du projet Maintenance prédictive chez Mecanex, entretien*

Dans ce cadre, un jeu de données sera considéré comme biaisé non pas parce que c'est un expert plutôt qu'un autre qui aura fait un choix particulier, mais plutôt parce que les données en question sont spécifiques à un type d'équipement dont les caractéristiques ne sont pas comparables à d'autres. Cet aspect est crucial, car il vient également mettre en doute la promesse d'efficacité de systèmes dont la faculté à généraliser ne se trouve plus vérifiée. En ce sens, le terme de *biais* prend ici une nouvelle coloration, celle d'une source d'erreur. Comme l'ont remarqué L. Vuarin et V. Steyer (2023) dans leur analyse des interprétations organisationnelles de l'explicabilité, les grands principes de l'éthique de l'IA (ici l'équité, chez L. Vuarin et V. Steyer la transparence) sont ainsi intégrés de façon inattendue dans les entreprises. Ils servent de nouveaux moyens de s'intéresser à la production d'erreurs. Sur les terrains de ces auteurs, l'explicabilité n'importe pas vraiment tant que le système marche. De la même façon, le thème des biais, appliqués aux équipements de Mecanex, offrent simplement une nouvelle manière de s'intéresser aux erreurs produites par les systèmes numériques.

Le projet de maintenance prédictive pourrait, à terme, demander une multiplication des modèles, variés, situés pour ainsi dire, et c'est ce qui génère un intérêt pour de potentiels *biais*. Les enquêtés ne succombent pas au récit de systèmes d'IA objectifs par nature, prêts à l'emploi dans n'importe quelle situation. Au contraire, ils perçoivent le travail qui est à poursuivre pour les adapter au contexte dans lequel ils sont amenés à être implémentés. Il n'y a donc pas lieu d'une critique des erreurs humaines pour justifier le recours à un système d'IA plus objectif : cette dimension de l'objectivité n'est pas du tout abordée par les enquêtés de Mecanex.

Désamorcer la comparaison humain-machine

Au fond, la comparaison humain-machine qui est très prégnante dans la promotion médiatique de l'IA n'est pas seulement contredite par nos enquêtés, elle est anticipée et combattue. Le système d'IA est présenté comme un outil, un nouveau système à ajouter dans la « trousse à outils » (selon l'un des ingénieurs) pour compléter une palette technique existante. Qualifier les systèmes d'IA d'outil est une ritournelle bien connue. Quiconque a pu formuler un jour des critiques à propos d'usages néfastes de l'IA,

a pu se voir rétorquer que l'IA n'est qu'un outil, à l'instar du couteau ou du tournevis[215]. Tout se jouerait alors dans l'usage choisi de cet outil, dont l'ambivalence remarquée remettrait la responsabilité d'une mauvaise utilisation dans la main des utilisateurs.

Cette qualification d'outil peut étonner au sens où la complexité sociotechnique d'un système d'IA ne permet pas d'en avoir une maîtrise exhaustive ou de le réparer. A ce titre, il est difficile de percevoir l'IA comme une batterie d'outils conviviaux (maniables) qui ne feraient que prolonger l'action, pour reprendre la terminologie d'I. Illich ([1973] 2021). Mais à Mecanex, réfléchir à l'IA comme à un outil sert à la fois à témoigner d'une considération pour les compétences existantes dans l'entreprise et à la capacité d'adaptation de ceux qui les détiennent. Cette reconnaissance des aptitudes existantes conduit justement à vouloir transposer la connaissance, élaborée dans la pratique de la maintenance ou du prototypage, dans le système d'IA lui-même.

> « [Les experts] sont des personnes qui connaissent très bien les équipements, donc surtout au niveau mécanique, applicatif, ou des personnes qui sont dans les fab et qui ont une bonne expérience. D'ailleurs, avant les prédictions de défaillance ou autre, ces experts-là regardaient régulièrement les courbes des équipements, les [différents paramètres], etc. Et à l'œil, étaient capables de dire, "tiens, cet équipement-là, il y a un problème". Et donc, c'est ça qu'il faut qu'on arrive à retranscrire. »
>
> *Ingénieur Logiciel chez Mecanex, entretien*

Nous suggérons d'apparenter cette entreprise à un processus de « réification de la connaissance », déjà identifié par D. Forsythe (1993a) dans son travail sur les systèmes-experts. La connaissance est perçue comme un assemblage d'énoncés, un matériau à extraire, qui peut ensuite être explicité puis intégré dans un système sociotechnique[216]. Cette reconnaissance de l'expertise des salariés génère malgré tout une certaine ambiguïté : si le but est d'outiller le technicien de maintenance, dans quelle mesure dupliquer son savoir dans un dispositif technique supplémentaire se justifie-t-il ? C'est là que le rappel à l'IA comme outil prend tout son sens. Il est aussi une façon de construire « l'acceptabilité » des nouvelles technologies pour ne pas éveiller de méfiance indésirée (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009).

[215] L'argumentaire est classique, mais revient souvent dans les arènes normatives scientifiques et économiques de l'IA, par exemple chez L. Julia que nous venons d'évoquer (Tual 2019). Reconnaissons nos propres errements : encore imprégné de la culture ingénieure dans laquelle j'ai baigné tout mon cursus, j'ai moi-même pu mobiliser cette idée alors que s'ouvraient tout juste devant moi les portes des sciences sociales, lors d'un entretien à visée de vulgarisation donné avant le début de ma thèse.

[216] D. Forsythe (1993a) montre justement à quel point la connaissance intégrée dans les systèmes experts est fragile, notamment à cause du caractère « tacite », c'est-à-dire non-dit voire indicible, de la connaissance acquise par l'expérience (Polanyi 1967). Sa mise en texte, sa formalisation, en est rendue difficile.

3.d. Comment l'IA remet en débat la question de la compétence des salariés

L'intégration de systèmes automatisés ne s'envisage pas systématiquement selon des paradigmes de substitution, qu'il s'agisse de l'emploi ou de la tâche. Chez Mecanex, les inquiétudes pointent majoritairement vers la question de la préservation des compétences[217]. C'est ce débat que nous souhaitons présenter ici afin de conclure cette section.

L'IA pour la maintenance prédictive chez Mecanex

Pour bien comprendre les enjeux que peut avoir l'IA dans le travail chez Mecanex, il nous faut préciser en quoi consiste le système technique qui y est développé. Les équipements que fournit Mecanex demandent une certaine attention. Ce sont des machines complexes, fortement mécanisées, qui impliquent par conséquent d'importants efforts mécaniques. Au bout d'une certaine durée, qui se compte en années voire en dizaine d'années, ces équipements peuvent faillir. Comme ils sont directement intégrés à la production, leur casse (ou leur dysfonctionnement) est un problème majeur : elle risquerait de perturber le flux productif de leurs clients. Pour l'éviter, des techniciens de maintenance sont spécialement chargés d'assurer leur bon fonctionnement. Mecanex envoie chez ses clients des techniciens qui passent ainsi la majorité de leur temps de travail à l'extérieur des locaux de leur entreprise. Le dispositif en cours de conception est ainsi à destination des clients de Mecanex, certes, mais aussi de ses propres techniciens sur place.

La maintenance pour corriger, prévenir, prédire

On peut distinguer différentes manières d'approcher l'activité de maintenance du point de vue de la temporalité de l'action des techniciens : maintenance corrective, maintenance préventive, maintenance prédictive.

La maintenance corrective situe l'activité de travail en aval de la panne (Kaabi-Harrath 2004). Le problème technique est constaté puis réparé après qu'il a eu lieu. Comme il peut arriver à n'importe quel moment, il est difficile de prévoir à l'avance un planning d'action.

Une seconde approche, préventive, cherche à agir avant la survenue du problème (Héng 2023), avec en guise de leitmotiv *mieux vaut prévenir que guérir*. Pour ce faire, une estimation du risque de casse est réalisée, de sorte à planifier des visites régulières et systématiques des techniciens de maintenance pour entretenir les équipements et vérifier qu'ils sont toujours en situation de conformité.

La maintenance prédictive est une troisième approche, plus récente. Elle propose de recourir à des données issues de capteurs positionnés sur les équipements, par exemple des capteurs de vibration, afin d'anticiper le moment où celui-ci pourrait défaillir (Thomas 2012). Dans le cas idéal, le système d'alerte prévient suffisamment à l'avance pour qu'une visite soit effectuée avant la survenue d'une panne, mais

[217] Il nous faut réitérer, tout de même, qu'aucun technicien de Mecanex n'a été interrogé lors de cette enquête. Les préoccupations que nous présentons dans cette sous-section et les précédentes ne concernent que des personnes ayant un pouvoir de décision ou du moins d'initiative, avec un certain nombre de responsabilités (gestion d'une équipe pour la plupart).

suffisamment tard pour réduire le nombre de visites, et donc diminuer, en principe, la charge de travail. Tout le jeu devient alors d'optimiser le nombre et le moment des visites. C'est avec cette dernière approche en tête que le dispositif développé chez Mecanex est conçu :

> « Le prédictif, on est sur une approche multivariée qui doit nous permettre d'identifier une rupture ou en tout cas une dégradation de la performance à horizon [pause] ce qu'on vise c'est une semaine. Donc là c'est une information pertinente apportée au client pour l'aider à une prise de décision en fonction de sa densité de planning de prod : "Quelle est la bonne fenêtre à libérer, pour pouvoir réaliser la maintenance nécessaire ?" »
>
> *Responsable Innovation chez Mecanex, entretien*

L'un des objectifs du système est de produire des alertes en cas d'anticipation du dysfonctionnement d'un équipement. Ces alertes demandent une réponse rapide, mais pas immédiate : tout l'enjeu est de permettre au client sur place d'insérer l'intervention de maintenance au moment opportun, de façon à perturber le moins possible la production, tout en évitant une panne :

> « Je dirais que le client lui […], il a besoin d'anticiper tout ce qui peut perturber sa production. Parce que s'il fiabilise les systèmes qui lui permettent de produire, il va fiabiliser sa production et donc sa réponse à ses propres clients. »
>
> *Ingénieure Support chez Mecanex sur site client, entretien en visioconférence*

De façon plus générale, le discours des enquêtés est révélateur d'une volonté de s'effacer du processus productif. Même si les équipements fournis par Mecanex permettent son bon déroulement, ils n'en constituent pas le cœur d'intérêt. Ils sont plutôt perçus comme des contraintes par leurs clients :

> « Le Saint-Graal du client, un équipement c'est : il fait *Start*, ça démarre, il en entend jamais parler. A une semaine de mourir, il veut recevoir une alerte pour planifier sa maintenance, et arrêter, et que l'équipement casse pas pendant un batch de process[218]. Le premier fournisseur qui est capable de fournir un équipement comme ça avec un tarif qui *fit*[219], il achète. Et bien sûr qu'il soit pas obligé de le changer toutes les semaines. »
>
> *Ingénieur Logiciel chez Mecanex, entretien*

La calibration du système d'IA est donc au cœur du développement réalisé, de sorte à trouver un bon équilibre entre trop d'alertes ou alertes trop anticipées (dont certaines seraient jugés inutiles) et pas assez d'alertes ou alertes trop tardives (ce qui conduirait à des pannes et donc à l'interruption de la production).

[218] « pendant une étape de fabrication ».

[219] « qui correspond ».

Une continuité dans les modes de maintenance (1 / 2) ? Du préventif au prédictif

Même si le chemin vers la généralisation des pratiques de maintenance prédictive reste incertain, il apparaît dans la continuité de l'évolution des pratiques de la maintenance, comme le révèle une enquêtée détachée sur site :

> « Justement c'est une des évolutions que j'ai pu constater sur toutes les années où j'ai travaillé là, en support site pour [la ville où l'enquêtée travaille de façon détachée]. Au début on faisait quasiment que du correctif. Ensuite on a commencé à faire à équilibrer un peu plus avec le préventif. Donc un changement préventif sur certaines pièces, pour augmenter la durée de vie des équipements et minimiser les *down*, enfin les temps d'arrêt côté équipements de production. Et depuis au moins 5 ans, le client a introduit une notion de prédictif sur certaines choses. C'est là qu'ils ont commencé à travailler sur les vibrations. »
>
> *Ingénieure Support chez Mecanex sur site client, entretien en visio-conférence*

Cette manière de conduire les activités de maintenance, sur la base d'alertes probabilistes, n'est-elle qu'un prolongement du travail tel qu'il était fait auparavant, simplement outillé par de nouveaux dispositifs ? Autrement dit, la continuité dans le déploiement de technologies préventives donne-t-elle lieu à une continuité dans la pratique de la maintenance ?

Pour y répondre de façon précise, il faudrait approfondir l'enquête auprès des techniciens eux-mêmes. A défaut, nous pouvons au moins examiner les changements tels qu'ils sont escomptés. Longtemps mis à la marge de la sociologie, le travail de maintenance a récemment été remis à l'agenda des sciences sociales, notamment grâce au livre de J. Denis et D. Pontille, *Le soin des choses. Politiques de la maintenance* (2022). Décrite comme une activité multisensorielle par les auteurs, on pourrait imaginer que la maintenance devenue prédictive augmente la palette des façons de connaître l'équipement grâce au secours de capteurs (vibratoires en l'occurrence). Certes, il est possible de toucher la machine, mais seulement en certains endroits, d'autres étant inaccessibles à la main : le capteur peut être placé plus librement et communiquer de nouvelles informations précieuses. Néanmoins, en réduisant *in fine* la fréquence des contacts avec les machines (puisque le but est de minimiser le nombre des rencontres entre techniciens et machines), il apparaît que la posture prédictive pourrait favoriser un décentrement d'une pratique de soin de la machine, pratique que J. Denis et D. Pontille qualifient de « *care* ». Là où, dans les activités de maintenance traditionnelles « l'attention [est] motif et résultat du déplacement » (Denis et Pontille 2022:3), le principe de la maintenance prédictive est justement de délocaliser l'attention, de l'automatiser. Le mouvement ne serait plus justifié que par l'alerte fournie par le dispositif d'IA qui agirait en garant de l'intégrité matérielle des machines. Mais on ne peut réduire ces alertes à une injonction technique au travail, ou à une forme de management algorithmique. Comme l'expliquent en effet les enquêtés, l'objectif reste d'intégrer au mieux ces alertes dans des plannings de production chargés, mais qui pourraient s'adapter pour accueillir ces activités systématisées devenues ponctuelles. L'alerte n'est pas supposée déclencher une intervention sur un équipement, mais plutôt une réflexion autour du meilleur moment auquel une intervention devrait être planifiée. Ce que nous avons pu percevoir

dans les anticipations présentées par les enquêtés, c'est que la transformation du travail de la maintenance pourrait s'opérer en priorité dans sa planification plutôt que dans sa réalisation pratique[220].

Une continuité dans les modes de maintenance (2 / 2) ? Du prédictif au prescriptif

Y a-t-il une marche supplémentaire, une étape suivante, pour le futur de la maintenance des équipements développés par Mecanex ? La réponse est oui, même si sa réalisation fait l'objet d'âpres discussions au sein de l'entreprise. Après la maintenance prédictive, il est possible d'envisager une maintenance prescriptive :

> « En gros on est dans un processus qui est destiné initialement à faire du prédictif, de la maintenance prédictive. On est en train de filer sur le prescriptif, qui est la suite. A savoir, on décline les indicateurs en propositions d'action, donc là c'est une autre étape qui est en train de s'amorcer. […] L'outil, fort de ses données prédictives, connaissant un environnement donné […] va être en capacité de proposer certaines actions, au choix hein, toujours libre à l'utilisateur de déterminer ce qu'il prend ou pas. Mais il peut potentiellement se faire épauler par ça. […] Notre vision en tous cas s'arrête là. Parce que par exemple on pourrait conditionner un pilotage autonome de la machine, c'est-à-dire qu'il y a une détection d'un incident et puis il y a une prise de décision autonome du produit. Ça c'est pas encore d'actualité, parce que les conséquences dans ces milieux-là sont trop importantes […]. Même si la réflexion pourrait s'amorcer dans certains cas d'usages vraiment très extrêmes. »
>
> *Responsable du projet Maintenance Prédictive chez Mecanex, entretien*

Le paradigme prescriptif va un cran plus loin dans l'intensité de l'interaction entre utilisateur et dispositif technique[221]. Le système d'IA est supposé non seulement alerter sur la possibilité d'une dérive, d'une panne, mais également fournir des éléments de solution, de marche à suivre. La question est de savoir à qui devraient justement être proposées ces recommandations, et c'est précisément là que se pose le débat. Comme l'indique le responsable du projet dans le verbatim précédent, une première position consiste à souhaiter voir le système prescriptif « épauler » l'utilisateur, c'est-à-dire le technicien de maintenance. La logique est encore celle de l'outil (que nous décrivions dans la sous-section (**I.**3.c), c'est-à-dire que le système viendrait s'ajouter à la somme de l'arsenal technologique dont disposent les techniciens de maintenance. C'est en termes de dynamiques d'appropriation, de résistance, que le rapport des salariés à ce nouveau système serait ainsi à interroger. Mais une deuxième position apparaît dans le discours d'autres enquêtés :

> « Et le prescriptif là c'est l'étape d'après, c'est ce qu'on voudrait atteindre ultimement, c'est être capable de faire des recommandations sur l'ajustement, voire rendre le produit auto-ajustable en fonction de conditions de fonctionnement. C'est-à-dire que le produit constate au travers d'un apprentissage préalable qu'il est en train de dégrader sa performance et il est capable d'ajuster, il a en fait un profil de mission qui lui permet de ralentir sa dégradation, pour donner plus de temps

[220] Bien entendu, cette analyse est prospective, et il faut appeler à la prudence dans les suppositions (aussi bien celles des enquêtés que les nôtres) : des travaux empiriques devront confirmer ou infirmer ces propositions.

[221] Notons bien que la maintenance prescriptive n'est pas mise en place pour le moment, mais seulement imaginée par les enquêtés comme un futur possible de l'activité de maintenance.

au client par exemple, ou d'envoyer un signal à un équipement qui le sursollicite et finalement de demander une forme d'allègement de sa charge. On a cette logique d'écosystème qu'on essaie de développer qui est un petit peu délicate dans notre position de fournisseur finalement, de choses qui sont vues comme des commodités par nos clients. »

Responsable Innovation chez Mecanex, entretien

Dans cette autre perspective, le système fournirait en fait des solutions pour lui-même, ou plutôt pour la machine dont il deviendrait, partiellement, un pilote. Même si les techniciens ne sont pas nécessairement absents de cette vision, il n'empêche que le but est de donner une plus grande autonomie d'action à l'équipement lui-même, dans une logique de l'interconnexion qui est à la base de l'*Industrie 4.0*. La maintenance prescriptive serait alors le vecteur d'une transformation non plus seulement de la manière de planifier le travail de maintenance, mais également de l'effectuer, dans l'interaction même avec l'équipement. Il est difficile de tabler sur la nature de ces transformations sans les voir s'opérer. On peut malgré tout estimer que l'application d'une telle approche managériale viendrait transformer le rapport des techniciens à leur travail.

Rivalité entre expertise existante et émergente dans l'introduction de l'IA

Un autre débat concerne justement l'émergence de nouvelles expertises et leurs relations avec les expertises déjà existantes au sein de l'entreprise. Deux paradigmes épistémologiques se rencontrent en particulier : celui des données (*data-driven*) et celui de la théorie (*theory-based*). Dans les deux cas, l'intérêt porte sur les modèles du réel et la façon de le représenter.

Le premier paradigme découle de la perspective andersonienne que nous avons déjà évoquée en amont de ce chapitre (Anderson 2008). Ce paradigme se caractérise par un intérêt fort pour les données, non pas comme moyen de valider ou de consolider un modèle, mais plutôt pour générer ledit modèle. Il se résume de la façon suivante : à partir de données, et si elles sont suffisamment nombreuses, variées, et de bonne qualité, on peut construire une représentation adéquate du réel. D'une certaine façon, cette perspective témoigne d'un resurgissement du raisonnement inductif dans la méthode technoscientifique. Le déploiement de l'IA est en général apprécié dans ce paradigme, dans l'idée qu'il puisse exaucer les souhaits qui s'étaient forgés dans les années 2010 autour des mégadonnées[222] (*Big Data*). Chez Mecanex, les ingénieurs sont invités à explorer ces pistes :

« Mettre en œuvre des solutions qui permettent des traitements avancés sur les données, en interne, oui évidemment c'est encouragé. De toute façon les volumes de données que nous manipulons et la complexité des facteurs obligent à avoir ce type d'approche. On a touché les limites depuis bien longtemps déjà de l'analyse statistique à la main, des bulles et voilà. On est bien au-delà de ça maintenant. »

Responsable Innovation chez Mecanex, entretien

[222] C'est-à-dire la possibilité d'une connaissance du réel au travers de l'analyse exhaustive des données qui le mesurent sous toutes ses coutures.

Le second paradigme est celui de la modélisation théorique, plutôt sur un mode hypothético-déductif. Les modèles sont établis, reconnus, mis à l'épreuve sur la base des lois de la physique et de contextes expérimentaux éprouvés. Ils se fondent sur une connaissance que plusieurs enquêtés qualifient « d'expertise métier » qui s'est construite sur la mise en application de ces théories dans des dispositifs spécifiques. Ce point de vue se traduit par une forme de perplexité qui vient mettre en doute les capacités des systèmes d'IA. Cette suspicion est plutôt relative qu'absolue, c'est-à-dire qu'elle est exprimée vis-à-vis des technologies (et des compétences associées) déjà présentes dans l'entreprise.

On voit le débat entre ces deux positions s'immiscer chez Mecanex, une entreprise à la culture technique importante et dont les ingénieurs, qu'ils soient chimistes ou mécaniciens, ont baigné dans le second paradigme (plus porté vers des démarches hypothético-déductives) depuis le début de leur formation. Mais cette expérience vient être percutée par l'engouement autour des approches basées sur les données, portée notamment par certains ingénieurs spécialisés dans le logiciel[223], qui fait réagir l'un des enquêtés :

> « Et c'est là où on a des stratégies qui sont différentes dans l'entreprise et on n'arrive pas à se comprendre… […] C'est qu'il y a des gens qui s'appuient sur […] le retour d'expérience. C'est-à-dire qu'on va mesurer des équipements et on va simuler des [incidents], ou, on va attendre des [incidents] et remonter des informations et pouvoir, par rapport à ce qu'on a mesuré, arriver à diagnostiquer et faire ça. Ça, c'est une voie. […] L'autre voie que je prends, c'est de dire, ben non, les lois de la physique, elles sont connues. Donc, il suffit de décrire correctement, de modéliser, au sens propre du terme, correctement notre produit, et si on sait modéliser correctement notre produit, on sait décrire tous les modes de fonctionnement. »
>
> *Ingénieur Modélisation chez Mecanex, entretien*

L'opposition entre les deux paradigmes n'est cependant pas si stricte. Comme certains enquêtés ont pu le rappeler par ailleurs, les équipements conçus par l'entreprise dépendent également d'une théorie physique élaborée qui encourage à adopter ce genre de perspective. Ces pratiques pourraient pleinement s'intégrer dans un paradigme basé sur la théorie.

> « Et c'est là où je suis un peu vieux jeu sur ce genre de trucs, vous savez, mais je dis "Les gars, vous devez d'abord comprendre votre produit. La priorité, c'est de comprendre votre produit. Vous devez avoir une théorie causale, de pourquoi les choses arrivent, et après vous pouvez utiliser les données pour défendre la théorie dont vous disposez déjà. Mais ne vous fiez pas à 100% aux données d'observation. C'est comme chercher une aiguille dans une botte de foin. Vous ne la trouverez pas. Vous ne la trouverez pas si vous n'avez pas assez de données." »
>
> *Directeur de l'innovation chez Mecanex, entretien en visio-conférence, notre traduction[224]*

[223] La dichotomie mécanique-chimie versus logiciel est un peu caricaturale : en pratique, tous les ingénieurs ont des connaissances dans l'ensemble des disciplines.

[224] Transcription originale en anglais : « And this is where I am a little bit old school on these kind of things, you know, but I say, "Guys, you need to understand your product first. First, understand your product", right? "You have to have a theory of causality, why the things are happening, and then you can use the data to support that

De cette rivalité qui voit réactiver une forme de débat épistémologique entre induction et déduction, on voit ainsi émerger un positionnement intermédiaire qui cherche à tirer parti des avantages de ces deux approches concurrentes. Plusieurs enquêtés mentionnent en ce sens l'intérêt de recourir à de nouveaux modèles qui intègreraient à la fois des mécanismes d'apprentissage (*data-driven*), mais également des éléments fixes basés sur des lois éprouvées de la physique (*theory-based*). Malgré cette résolution qui semble la plus à même de faire consensus, le responsable du projet de maintenance prédictive a conscience d'une possible confrontation entre ingénieurs experts :

> « J'avais noté quand même que dans les risques identifiés, on risquait de voir arriver des nouveaux acteurs, comme les *data scientists*, comme porteurs de l'expertise, au détriment d'autres détenteurs d'expertise. C'est ce truc-là, cet effet-là, faut essayer de le prévenir au maximum. C'est la combinaison de ces expertises qui va créer de la valeur, c'est pas un *data scientist* tout seul qui va faire les choses. Donc cette partie-là elle est essentielle. Encore une fois, il y a pas un secteur particulier qui détient l'information. Par contre oui, historiquement c'est comme ça que ça s'est fait. Mais ça peut être déstabilisant ouais. »
>
> *Responsable du projet Maintenance prédictive chez Mecanex, entretien*

Il nous faut bien comprendre qu'il ne s'agit pas là que d'un débat d'idées. Tout aussi argumentées qu'elles soient, les deux positions initiales reflètent des visions émanant de professionnels dont le statut est aussi assuré par l'intérêt qui est porté à leur discipline et à ses méthodes. La rivalité ne se traduit pas nécessairement dans une confrontation interpersonnelle. Malgré tout, elle est révélatrice d'une valorisation de son expérience qui se fait au détriment d'une autre, sous la contrainte des volontés de transformations de l'entreprise.

Une crainte vis-à-vis de la conservation des compétences

L'un des thèmes centraux de l'intégration de l'IA dans les organisations est celui de la compétence et de la capacité d'action, entre configurations « capacitantes » et « aliénantes » (Borel et al. 2024a). A Mecanex, cette préoccupation se place aussi bien au niveau des salariés que de l'organisation elle-même. Sur le plan de la connaissance, l'IA permet de filer la métaphore extractiviste qui découle de l'idée de « réification de la connaissance » décrite par D. Forsythe (1993a) : en intégrant le savoir dans le système technique, le savoir pourrait être perdu, comme s'il était véritablement retiré des salariés pour être mis ailleurs, où il serait difficile à récupérer. La métaphore n'est pas adoptée par nos enquêtés, qui envisagent plutôt un processus de destitution progressive du savoir. En perdant l'habitude d'aiguiser leur réflexion, d'investiguer les raisons des défaillances, les techniciens pourraient être déqualifiés progressivement. :

> « Après, sur place chez les clients, nos techniciens devront savoir sur quoi ils peuvent compter. Et là, va commencer à apparaître un problème, à mon avis, qu'on pourrait avoir à apparaître dans le temps, c'est qu'ils puissent compter sur [le système automatisé], mais sans perdre leur savoir-faire. Aujourd'hui, ils ont un savoir-faire parce que eux portent le diagnostic. […]

theory that you already have", right? "But don't rely 100% just on the data observation. This is just like looking for a needle in a high stack", right? "So you won't find it. You won't find it if you don't have enough data", right? »

[Je demande des clarifications : « Et de ton point de vue, qu'est-ce qui pourrait permettre de ne pas perdre la compétence ? »]

Qu'est-ce qui pourrait permettre de ne pas la perdre ? C'est qu'on s'efforce à demander aux [ingénieurs] de continuer de faire travailler son analyse humaine. »

Ingénieur Chimie chez Mecanex, entretien

S'il n'est jamais question de substitution à proprement parler, la crainte subsiste que l'interaction entre technicien et système de maintenance prédictive puisse être infructueuse sur le plan des compétences. La question du transfert des compétences reste ainsi flottante dans la discussion que nous avons pu avoir avec les enquêtés. Pour certains d'entre eux, le rapport à l'expertise est envisagé selon l'angle du pouvoir. Ils estiment que certains salariés pourraient être réticents à contribuer à l'amélioration d'un système qui pourrait les déposséder de leur expertise, et, tout compte fait, de leur statut au sein de l'organisation. C'est ainsi que sont anticipées certaines résistances. Elles sont peut-être entretenues par une dynamique du « pied-dans-la-porte » laquelle fait valoir des expérimentations dans le but de renforcer l'adhésion (Freedman et Fraser 1966) :

« Et pour en revenir aux capteurs de vibration, c'est assez compliqué à analyser, savoir si c'est une vraie alerte ou une fausse alerte, et du coup d'intégrer ça avec de l'intelligence artificielle, qui moi dans ma compréhension va faire un premier tri, en disant "pour moi c'est ça, pour moi c'est ça" mais ce tri sera, en tous cas dans un premier temps, confirmé par les équipes techniques de Mecanex. Il faut créer la confiance. »

Responsable Support client chez Mecanex, entretien

Dans le même temps, l'entreprise cherche à développer un savoir-faire interne associé à la technologie nouvelle et au travers des diverses expérimentations menées autour d'elles. Les seules anticipations ne permettent ainsi pas de savoir de quelle façon bénéficieront les apports de connaissances, et à qui.

Pour conclure sur ce point, nous avons montré que les promesses de remplacement du travail ou des tâches décrites (voir (2.c)) ne sont pas prises pour argent comptant par les enquêtés. Leurs préoccupations concernant l'organisation du travail s'ancrent dans une analyse assez fine (même si parfois surplombante puisqu'elle n'intègre pas les premiers concernés, à savoir les techniciens eux-mêmes) de la façon dont pourrait s'intégrer de nouveaux dispositifs dans leur organisation, et pointent des enjeux précis et délimités, comme celui du maintien de l'expertise. Le déploiement de l'IA est l'occasion de certains débats, de l'expression de certaines rivalités professionnelles qui questionnent le rapport entretenu avec l'innovation et la façon dont elle est menée.

Conclusion (II.3)

Cette section aura montré un décalage important entre les promesses associées au récit du renouveau industriel et à l'IA, et la façon dont ces thématiques sont appréhendées à Mecanex. Dans une industrie qui n'est pas *a priori* partie prenante du réseau de diffusion de la promesse de l'IA, les attentes sont alignées avec les promesses de façon relativement hétérogène. Si l'on a effectivement retrouvé des traces discursives de certaines promesses, par exemple en ce qui concerne l'inéluctabilité du changement technologique, il n'est pas clair que celles-ci découlent d'une diffusion de la thématique de l'*Industrie 4.0*. Il apparaît plutôt qu'à l'inverse, le discours de la quatrième révolution industrielle s'est inspiré de croyances déjà bien ancrées pour prospérer et faciliter sa diffusion. Son caractère disruptif, révolutionnaire, n'est en tout cas pas pleinement assimilé par les acteurs que nous avons rencontrés.

Sur l'IA plus précisément, les enquêtés se sont montré au fait des promesses à son sujet. Mais le plus souvent, ils se sont exprimés de façon à rejeter l'hyperbole, de sorte à esquisser un retour plus pragmatique aux applications possibles de l'IA. Qu'ils aient un espoir plus ou moins important dans les capacités des systèmes d'IA à résoudre leurs problèmes, les professionnels de l'industrie semblent de toute façon avoir en tête les limites potentielles de ces dispositifs.

Nous voyons ici comment les promesses peuvent être filtrées par ses acteurs-récepteurs, de sorte qu'ils peuvent en rejeter certains motifs, soit en les ignorant, soit, au contraire, en les combattant activement. Ces postures de rejet traduisent une inadéquation perçue entre la représentation forgée de la technologie dans le champ médiatique, et la perception individuelle de l'environnement technique, économique et de travail dans lequel les technologies sont amenées à être insérées. En radiologie, un processus de « professionnalisation » des promesses, qui consiste en une adaptation du discours auprès des professionnels, a pu être observé (Arena et al. 2024). On voit ici que la professionnalisation de la promesse passe par une altération et une remise en contexte pour aboutir à un énoncé plus crédible ; elle peut émerger de la propre interprétation des acteurs concernés par son déploiement.

Comment expliquer ce décalage entre promesses et vision réelle, cette perméabilité sélective aux discours révolutionnistes ? On peut faire l'hypothèse que la prégnance d'une culture technique importante chez Mecanex – dont l'interdisciplinarité a pu être trahie par les titres donnés aux enquêtés (chimie, mécanique, logiciel) – associée à une capacité à expérimenter et donc à éprouver les systèmes techniques, génère une résistance face à certaines rhétoriques du changement organisationnel. L'habitude de voir régulièrement arriver de nouveaux systèmes, et un certain désintérêt pour leur promotion à grande échelle, n'encouragent pas à propager une vision disruptive de technologies dont l'usage permettra de toute façon de révéler les intérêts mais aussi les limites. Proches des situations de travail qui intègrent ces technologies, les enquêtés de Mecanex adoptent une approche pragmatique visant à mettre à l'épreuve l'arsenal technique qui leur est promu. Notons enfin, car cela nous semble important, que plusieurs enquêtés (au moins deux sur les neuf) nous ont confié avoir suivi des formations universitaires courtes (formation continue) en management de l'innovation, durant lesquelles ils ont été amenés à se confronter à d'autres professionnels, mais aussi à des travaux de sciences humaines et sociales. Il est apparu clairement, au travers des échanges que nous avons eus avec eux (en entretien et informels), que cette parenthèse avait eu des effets notables sur leur façon de problématiser le déploiement des technologies, et avait pu infuser l'organisation.

SemiCorp dispose elle aussi, comme nous l'avons montré, d'un environnement riche en technicité. Cependant, celui-ci est beaucoup plus intermédié, inaccessible, et donc difficile à s'approprier. La part conséquente d'automatisation de procédés complexes favorise le sentiment du tout programmable. Comme les systèmes d'IA sont décrits de façon sidérante vis-à-vis des technologies existantes, leurs qualités, et dont leur déploiement, peuvent apparaître comme une évidence, dans la continuité de ce qui était possible jusque-là. Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, les embûches semées dans le cheminement de conception de ces systèmes viennent largement remettre en question ces idées préconçues.

Chapitre III – Mettre en œuvre l'IA industrielle : un travail des savoirs

Appropriation et usage des technologies, retour théorique

L'interaction entre organisation, technologie et individus est investiguée par différents champs la littérature en sociologie des techniques et des organisations. L'un de ces courants, la théorie de la structure adaptative, inspirée des travaux d'A. Giddens (1984), met au cœur de l'analyse les mécanismes d'appropriation des technologies (Coutant 2015). La focale est placée sur l'usage de la technologie, et surtout sur son adéquation avec la façon dont il avait été pensé par ses concepteurs (Leonardi et Barley 2010). La conception de la technologie crée des contraintes, des « affordances » (Hutchby 2001), qui encouragent ou découragent certains comportements d'usages (Leonardi et Barley 2010). D'autres chercheurs comme M. Akrich (1991), contributrice de la théorie de l'acteur-réseau, ont recours à la notion de « scripts » d'usage, qui rappelle également l'importance de la matérialité des dispositifs sociotechniques et leur dimension prescriptive. Ces scripts ne sont pas seulement des documents formels (notice d'utilisation, documentation), ils sont également inscrits dans la manière dont le système technique peut être appréhendé, dont l'usage est guidé par les fonctionnalités rendues disponibles à l'utilisateur. Intéressés par les façons dont sont utilisées les technologies en pratique, ces auteurs font le constat de dynamiques d'appropriation, de contournement, de résistance.

Le rejet initial du CatégoDéfo que nous évoquions dans le chapitre précédent, est emblématique de ce dernier cas. Parce qu'il produisait trop d'erreurs, le système ne correspondait pas aux attentes des techniciens. Ceux-ci ont dû le contourner en reclassifiant ces résultats, ce qui s'est révélé une activité plus longue qu'avant son introduction, et l'atelier Qualité s'est trouvé submergé. Le choix des techniciens a résulté d'un compromis entre deux injonctions que le déploiement du système a rendu contradictoires : faire un travail de bon aloi, et tenir des contraintes de temps par analyse pour ne pas submerger le service Qualité.

La figure de l'usager est longtemps restée ignorée par la sociologie des techniques (Flichy 2008). Ce faisant, l'objet technique a pu être considéré comme acquis, fixe, avec des caractéristiques inaliénables, déterminées par leurs designers. W. Orlikowski (2000) considère qu'il s'agit d'une erreur sur le plan analytique. Pour elle, il est nécessaire de distinguer d'une part le dispositif comme artéfact – une entité[225] physique, persistante dans le temps, identifiable – et d'autre part comme un objet de pratiques, ce qu'elle appelle la « technologie-en-pratique[226] ». Elle justifie sa posture : « Même si une technologie peut être considérée comme étant […] marquée par les suppositions et la connaissance du monde de ses développeurs à moment donné […], c'est seulement lorsque cette technologie est utilisée dans des pratiques sociales récurrentes que l'on peut dire qu'elle structure les actions des utilisateurs. Autrement dit, c'est seulement lorsqu'elles sont mobilisées dans l'usage de façon routinière que les propriétés

[225] La technologie, comme le rappelle S. Matthewman (2011), ne peut être réduite à des seuls objets (physiques ou virtuels), elle recoupe également des activités, des connaissances, des modes d'organisation et les systèmes sociotechniques qui les rassemblent.

[226] Une traduction de « *technology-in-practice* ».

techniques deviennent constituées par les usagers comme des règles particulières, et des ressources qui façonnent leur action[227]. » (Orlikowski 2000:408).

En conséquence, W. Orlikowski oriente l'analyse du prisme de l'appropriation vers celui de « l'énaction » (*enactment*[228]) des technologies, dans l'objectif d'analyser l'interaction humain-machine à partir de l'action humaine plutôt que des contraintes matérielles du système et de la façon dont elles sont appropriées (Orlikowski 2000). La perspective de l'énaction se concentre sur les pratiques (d'usage, de travail), et sur la façon dont elles émergent dans l'interaction entre l'individu et la technologie (Leonardi et Barley 2010). Une autre différence entre les approches par l'appropriation et celles par l'énaction réside dans la place donnée à l'intentionnalité dans le processus de conception. L'intentionnalité est plus marquée dans le cas de l'appropriation, qui suppose des desseins explicites au cours de la conception. Les facteurs socio-organisationnels conduiraient ensuite les utilisateurs à respecter, ou pas, la proposition d'usage formulée par les concepteurs.

Si l'on s'intéresse plutôt à l'énaction des dispositifs techniques, alors c'est dans l'usage lui-même qu'émerge le comportement d'utilisation. Cette approche nous paraît d'autant plus fructueuse dans le cas de systèmes sociotechniques complexes comme ceux que cette thèse étudie, à savoir des dispositifs de classification fondés sur l'apprentissage machine. Comme l'a montré la sociologue du travail A. Bidet (2008), citée par P. Ughetto (2018a:60), la diffusion de systèmes automatisés dans le travail conduit à un glissement analytique dans le prise en compte des objets techniques, depuis des « artefacts » stabilisés vers des « automates » mouvants. Ce que constate A. Bidet, c'est que les automates ne sont plus pensés au travail comme des « objets d'usage », de sorte que leur conception évacue maladroitement les situations pratiques d'utilisation. Le système est plutôt envisagé comme autonome et l'utilisateur n'est pas pensé, et donc pas considéré.

Ce qui est généralement imaginé lors de la conception d'un système d'IA, c'est avant tout sa fonction (classer), plutôt que son usage (servir à quelqu'un à classer). En ce sens, les modalités d'usage ne sont pas conceptualisées, et sont au mieux implicites. La nature probabiliste et partiellement aléatoire des systèmes d'IA – qui peuvent potentiellement donner des résultats différents à des entrées très proches – contribue d'autant plus à gommer ces scripts, s'ils existent. L'intérêt du chercheur intéressé par l'énaction est alors d'examiner comment, dans l'usage, l'interaction entre le dispositif et l'usager (ou le « concepteur-usager » qui met à l'épreuve le système dans son usage fréquent (Flichy 2008)) produit des effets, attendus ou non, en analysant les facteurs socio-organisationnels en jeu.

La sociomatérialité

L'analyse de l'usage des technologies au travers de la relation entre artefact et utilisateur préfigure les divergences entre deux courants de la sociomatérialité, incarnés par W. Orlikowski (2007; Orlikowski et

[227] « While a technology can be seen to have been constructed with particular materials and inscribed with developer's assumptions and knowledge about the world at a point in time […], it is only when this technology is used in recurrent social practices that it can be said to structure users' actions. That is, it is only when repeatedly drawn on in use that technological properties become constituted by users as particular rules and resources that shape their action » (notre traduction).

[228] Le terme n'a pas d'équivalent stabilisé en français, on lit parfois « énaction », voir par exemple (Godé-Sanchez 2008). Utilisé dans le jargon juridique, « *enactment* » se traduit plutôt par « promulgation ».

Scott 2008) d'un côté, et P. Leonardi (2012, 2013a, 2013b) de l'autre (Houzé et Meissonier 2018). Tous deux s'accordent sur l'importance de la matérialité dans l'étude du déploiement des technologies, un aspect qui avait pu être oublié par certains socio-constructivistes, à qui l'on a pu reprocher une forme de déterminisme social (Matthewman 2011). Le schisme porte sur l'ontologie des phénomènes étudiés. Pour W. Orlikowski, le social et le matériel sont inextricables, au sens où l'on ne peut séparer strictement artefact technologiques et êtres humains, qui n'existent qu'au travers des relations qu'ils entretiennent (Houzé et Meissonier 2018). Selon ce point de vue, il n'y a rien qui ne relève purement du social ou du matériel. Les entités (qu'elles soient technologiques ou humaines) ne possèdent pas leurs propres caractéristiques : ce n'est qu'au travers de leurs relations (réciproques) qu'elles peuvent être appréhendées. Cette posture prend un sens nouveau lorsque l'on s'intéresse à des systèmes d'IA, stochastiques par nature, portant une part d'aléatoire, d'imprévu, en bref, une technologie qui ne soit pas entièrement « scriptée[229] ». Chaque résultat d'usage nouveau est imprévisible dans l'absolu.

Sur le plan méthodologique, la théorie sociomatérielle est un peu aride, estiment E. Houzé et R. Meissonier (2018), au sens où elle n'est pas soutenue par le langage courant (notamment celui de potentiels enquêtés) ni par une interprétation intuitive du réel. Les auteurs semblent privilégier la vision de P. Leonardi, qui rappelle le rôle du matériel dans les interactions sociales, sans fusionner ces deux dimensions. Les dispositifs techniques ont des propriétés intrinsèques qui entraînent des réactions, sans les conditionner totalement : les facteurs relatifs à l'environnement d'usage, à l'organisation, aux conditions de travail, à l'identité de l'individu restent moteurs dans l'étude des phénomènes sociomatériels pour P. Leonardi.

Plutôt qu'approfondir une réflexion ontologique sur ce qui serait (ou pas) social, matériel, ou les deux à la fois, nous proposons de nous en tenir à un examen sociologique qui prenne en compte des variables aussi bien organisationnelles que techniques. Les systèmes d'IA, comme agencements d'éléments techniques hétérogènes (interface logicielle, catégorisations, micro-processeurs, données d'entraînement…), sont constitués par des processus organisationnels dans lesquelles les différents acteurs qui y sont engagés délibèrent, choisissent, négocient. En retour, ces systèmes participent à cadrer l'organisation, dans des processus d'énaction dans lesquels interviennent leurs utilisateurs et les concepteurs. Ceux-ci ne sont pas toujours si faciles à distinguer, nous y reviendrons.

Matérialité du numérique

Le débat sur la matérialité dans l'usage des technologies numériques est embrumé[230] par le slogan de la dématérialisation (Robert 2004), qui a pu donner l'impression que le recours au numérique permettait de préserver des ressources tangibles (le papier, l'encre). P. Robert (2004) préfère parler de « virtualisation » au sens où une part croissante de l'information est désormais inaccessible sans un

[229] Ou plutôt, qui soit partiellement « scriptée » par des données et des processus d'optimisation qui ne permettent pas d'en retirer un fonctionnement déterministe du point de vue de l'utilisateur ; on effleure ici les questions qui relèvent de l'explicabilité (Pégny et Ibnouhsein 2018).

[230] Les débats sur la matérialité du numérique reprennent malgré tout une certaine vigueur depuis quelques années, en traitant la question sous l'angle des infrastructures et ressources nécessaires au bon fonctionnement du réseau numérique mondial. Le séminaire « Matérialités du numérique » (Centre Internet et Société, CNRS), organisé par Valentin Goujon, Adrien Tournier et Hugo Estecahandy, a proposé un programme fourni autour de ces thèmes entre 2023 et 2025.

support numérique adapté, reposant lui-même sur une infrastructure conséquente, tout aussi tangible, et techniquement plus complexe (typiquement les *data centers*).

Dans la sociologie des organisations, la persistance d'une certaine confusion dans la définition de la matérialité est également déplorée par P. Leonardi (2010). Il note que la matérialité est essentiellement entendue comme le fait d'objets, ayant une substance, une réalité physique, que l'on puisse toucher. Selon cette définition, la matérialité du numérique serait réduite aux considérations relatives aux artéfacts concrets qui les sous-tendent. Pourtant, remarque P. Leonardi, nombre d'études sur le sujet viennent s'intéresser à des logiciels, qui ne correspondent pas à cette vision d'une réalité physique concrète. Il propose d'élargir la focale en prenant en considération d'autres visions de la matérialité. L'une d'elles est « l'instanciation pratique » (*pratical instantiation*), c'est-à-dire la concrétisation d'une idée abstraite. Un logiciel de simulation de crash de voiture, par exemple, matérialise les modèles physiques qui sont supposés expliquer les mouvements et les frottements. De la même façon qu'une matérialité physique crée des contraintes particulières, cette matérialité pratique conditionne un champ de possibilités que l'utilisateur est susceptible de mettre en œuvre, ou d'impossibilités qui le restreignent dans son action. C'est tout l'enjeu des études de design des interfaces logicielles que de les rendre ergonomiques et faciles d'utilisation. De la même manière, les systèmes de classification, nous le verrons, imposent un certain nombre de contraintes liées à la rigidité de leurs catégories et de leurs résultats. L'utilisateur peut être amené à s'y conformer ou pas.

De l'usage dans la conception et inversement

En réalité, l'usager et le concepteur ne font parfois qu'un. Ce ne sont pas des rôles précisément distribués. L'appropriation du système peut s'envisager comme une nouvelle étape de conception plutôt que comme un seul résultat contingent d'une phase de conception antérieure. C'est en ce sens que l'on peut comprendre l'appropriation comme une forme de « conception dans l'usage » (Carroll 2004). F.-X. de Vaujany, en référence notamment aux travaux de W. Orlikowski qu'il inscrit dans cette même perspective, caractérise l'appropriation « comme un processus contingent, ouvert, complexe et continu » (2006:118). Sur un plan moins conceptuel, comme nous avons pu l'observer, les premiers utilisateurs du ClassifiMotif sont en fait ses ingénieurs-concepteurs. La nature expérimentale du déploiement de l'IA, relevée par G. Gaglio et A. Loute (2023), engage les développeurs dans des essais et erreurs continus, qui se prolongent bien après la mise en service initiale. Le concepteur se trouve être utilisateur par nécessité, de sorte à éprouver le système. Parallèlement, l'utilisateur devient concepteur par sa pratique, en tant qu'il peut réorienter l'usage du dispositif selon ses contraintes et ses besoins. En dépit de ces remarques, nous garderons les qualificatifs de concepteur et d'utilisateur dans nos analyses, au sens où elles permettent de délimiter l'agentivité des acteurs en présence dans les projets présentés.

De façon plus générale, une analyse focalisée sur un processus de conception tendrait à le faire débuter à des moments charnières comme la formulation de l'idée par un membre de l'organisation, le processus collectif de problématisation, ou, plus tardivement, par la pose de premières briques techniques. Il est pourtant possible de les faire remonter bien plus loin. C'est en partie ce que nous avons tenté de faire dans les premiers chapitres, en montrant comment des discours de promotion de l'*Industrie 4.0* pouvaient être repris (ou explicitement rejetés) par les acteurs de l'industrie.

L'échec de la dichotomie entre conception et usage à décrire pleinement des modes d'interaction avec la technologie (et notamment pour ce qui concerne les systèmes d'information) conduit certains auteurs à vouloir rediriger l'intérêt de la recherche vers d'autres catégories analytiques. D. Bailey et S. Barley (2020) suggèrent de se tourner vers une analyse plus exhaustive qui intègre l'ensemble de la trajectoire des technologies, voir (Figure 35). Au-delà des seuls mécanismes de « variation » liés aux contextes de déploiement de ces systèmes, D. Bailey et S. Barley encouragent l'exploration d'autres voies relatives aux relations de pouvoir, aux idéologies, aux institutions. Une telle entreprise n'est pas chose aisée, d'autant qu'en réalité, les facteurs politiques, idéologiques et institutionnels ne concernent pas seulement les périodes qui précèdent ou qui suivent le déploiement d'une technologie. Celui-ci, au contraire, est intégré de bout en bout dans des contextes particuliers. Ces facteurs sont vraisemblablement plus diffus et difficiles à quantifier que ceux qui interviennent dans des phénomènes d'utilisation des technologies, à des échelles plus réduites.

Méthodologiquement parlant, il reste opportun « d'étendre la chronologie » (*extend the timeline*) dans l'étude des technologies (Bailey et Barley 2020). Pour étudier pleinement le déploiement des systèmes techniques dans les organisations, il devient nécessaire de multiplier les points de vue, aussi bien en regard des acteurs interrogés que des disciplines de recherche, et de retracer les biographies de ces dispositifs (Williams et Pollock 2012). Le processus de déploiement d'un système ne peut se réduire à sa phase d'adoption, qui intervient finalement assez tard dans sa vie d'artéfact technologique. En l'occurrence, en dehors des travaux pionniers de l'anthropologue D. Forsythe (1993a, 1993b, 2001) sur les systèmes-experts, D. Bailey et S. Barley notent que peu d'investigations ont en effet été menées à long-terme sur le développement des technologies basées sur l'IA. C'est l'une des voies qui nous a été offerte par l'étude de terrain réalisée à SemiCorp, à partir de laquelle ce chapitre sera construit.

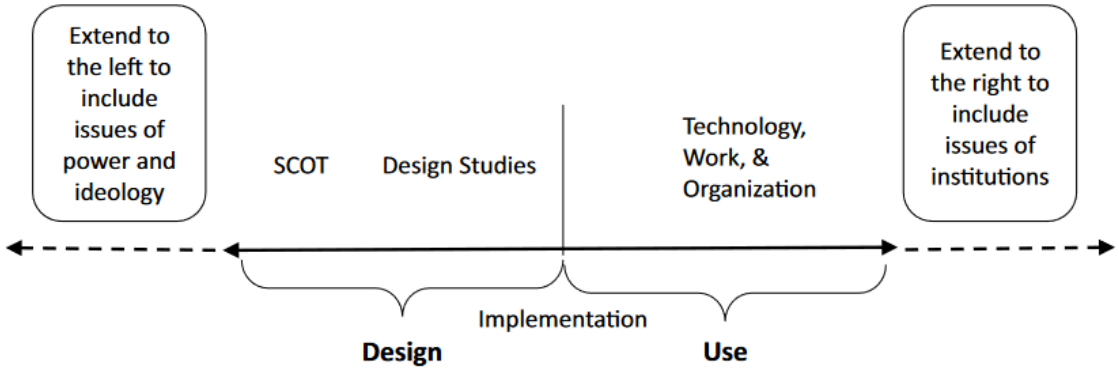


Figure 35 : Trajectoire temporelle des technologies avec, sur les côtés, les champs de recherche qui méritent un approfondissement et, au milieu, les courants qui travaillent déjà sur les phases de conception et d'usage, respectivement. Tiré de (Bailey et Barley, 2020).

Pratiquer les savoirs

Dans le cas de systèmes d'automatisation de tâches, en particulier, l'attention mérite d'être portée vers la tâche même, que l'on cherche à automatiser. Avant que ne soit envisagée la conception d'un système automatisé, la tâche est déjà l'objet de pratiques, de compétences, de gestes et d'attentions. Elle est en ce sens l'objet de savoirs, tacites ou non, qui sont chamboulés par l'introduction du système. D. Forsythe (1993a) a montré comment, dans les années 1980-1990, les développeurs de systèmes-experts se

mettent justement en quête de ces savoirs d'expertise pour les intégrer dans les systèmes qu'ils conçoivent[231]. Ils procèdent pour cela à des entretiens avec des experts, par exemple des médecins. La connaissance, alors « réifiée » (Forsythe 1993a), est vue comme un ensemble délimité, précis, détenu par les médecins-experts interrogés pour l'occasion, et qu'il s'agit alors d'extraire. Dans le milieu industriel, plusieurs travaux ont aussi investigué les pratiques de développement des systèmes-experts (Hatchuel et Weil 1992; de Terssac, Soubie, et Neveu 1988). Ils ont montré comment ces processus ne visaient pas tant à objectiver les savoirs existants qu'à s'en affranchir.

Les dispositifs sur lesquels nous nous sommes penchés sont d'abord des systèmes de classification dont la conception tient à la fabrication de catégories, et donc de savoirs, des énoncés tenus pour vrais, ou du moins comme des références destinées à guider l'action, et qui visent à être partagées au sein du service. Le savoir est un angle intéressant pour apprécier les processus de conception-utilisation des systèmes d'IA, car il met en relief le travail de production de l'IA et les choix qui lui sont inhérents. Après tout, les savoirs techniques sont l'une des nombreuses formes de la technologie (Matthewman 2011).

Dans leur étude d'une entreprise scandinave qui conçoit des systèmes de l'IA pour la santé, A. Henriksen et A. Bechmann (2020) prennent le parti d'explorer les différentes « pratiques de vérité » (*truth practices*) mises en place par les développeurs. La formulation a de quoi surprendre : comment la vérité pourrait-elle être pratiquée ? La revue de la littérature d'A. Henriksen et A. Bechmann montre pourtant comment « la (les) vérité(s) constituent le fondement du travail de l'IA, qu'il s'agisse de défis concernant la définition des vérités terrain, la production de normativité ou l'interprétation de résultats de recommandations[232]. » (2020:5). Les savoirs sont élaborés, mis en perspective, travaillés et retravaillés.

A l'instar du système d'IA en tant que dispositif sociotechnique, les savoirs qui le sous-tendent méritent d'être interrogés selon les mêmes canons : descriptifs (conception, utilisation) et conceptuels (appropriation, énaction), avec une visée explicative.

Propos du chapitre et plan

L'enjeu de ce chapitre sera d'interroger les pratiques de connaissance, de circulation des savoirs, et de les mettre en perspective vis-à-vis de contraintes organisationnelles et de perception du travail et de sa valeur. Nous sortons du champ de la promesse, qui nous a guidés dans les premiers chapitres, pour aller vers celui de la réalisation effective de ces dispositifs.

Nous commencerons par établir les prérequis infrastructurels sur lesquels repose le déploiement de nouvelles technologies dans l'industrie (1). Nous repèrerons les canaux d'introduction de ces technologies en montrant comment ils relèvent de différentes motivations dans l'automatisation des tâches (1.a), avant de faire le constat de la nécessité d'une masse critique de données (et donc de moyens de les collecter et les stocker) pour mettre en œuvre les projets d'IA (1.b). Une attention sera

[231] Cette activité s'inscrit dans une discipline scientifique qui émerge dans les années 1980, la cognitique (Truong Ngoc s. d.). Ses pratiquants sont appelés les cogniticiens, ou « *knowledge engineers* ».

[232] « In this way, existing ethnographic studies show in different ways, and in our interpretation, how truth(s) are the foundation of working with AI either as challenges with defining ground truths, producing normativity, or interpreting recommendation outcomes » (notre traduction).

portée vers le statut des salariés perçus en interne comme les « experts en mégadonnées », et leur évolution en termes de positionnement au sein de l'organisation (1.c).

La suite du chapitre visera à décrire en profondeur le « travail épistémique » de la conception de l'IA pour la classification (2). Nous traiterons d'abord du caractère non-linéaire des projets de conception de systèmes d'IA (2.a), puis nous détaillerons les activités épistémiques (catégorisation, annotation, peuplement) qui les constituent (2.b). Au travers d'un généalogie épistémique des catégories du ClassifiMotif, nous montrerons comment les processus de catégorisation peuvent contribuer à prescrire l'organisation du travail (2.c).

Au travers de deux vignettes ethnographiques portant sur le nettoyage de bases de données (3.a) et l'établissement d'une catégorie de défauts (3.b), nous expliciterons ensuite le processus de transformation (plutôt que de transcription) des savoirs à l'œuvre dans la conception des bases de données.

Une dernière section sera enfin consacrée aux modalités d'évaluation des systèmes d'IA. Nous aurons l'occasion, à cette fin, de mettre en lumière les hypothèses simplificatrices permettant aux ingénieurs de transformer l'évaluation d'un système d'IA en un problème mathématique (4). Nous montrerons comment ces évaluations reposent, de façon centrale, sur des critères de performance objectivés (4.a), qui demandent une amélioration permanente prenant la forme d'une « maintenance épistémique » (4.b). Pourtant, et nous terminerons sur ce point, la performance du système doit ultimement satisfaire des contraintes organisationnelles qui peuvent conduire à repenser sa performance technique, voire à la dégrader (4.c).

1. Introduire l'IA dans l'espace de travail : un positionnement par rapport à l'existant à construire

Les systèmes d'IA n'émergent pas d'eux-mêmes, de façon acontextuelle, dans les organisations. Ils sont envisagés, introduits, testés, et déployés. L'organisation dans lequel ils s'imbriquent leur préexiste, et peut être reconfigurée, par la pratique, ou par des choix d'organisation. Ces processus se produisent sur le temps long, en prenant appui sur l'organisation actuelle du travail, qui conditionne au moins partiellement le développement des systèmes. Cette section sera justement consacrée aux prémices du projet de déploiement du ClassifiMotif. Nous chercherons à montrer comment l'énaction du système d'IA, c'est-à-dire sa mise en pratique dans le contexte du service Qualité, demande une intégration au sein de l'organisation existante. Elle renvoie d'abord à la façon dont le système est introduit dans l'organisation puis mis en valeur, de façon différenciée entre les niveaux hiérarchiques (1.a). Par ailleurs, comme nous le montrerons, le développement de systèmes de classification adaptés à un champ d'activité particulier (ici la production de semiconducteurs), nécessite une infrastructure préalable de la donnée conséquente (1.b). Nous verrons enfin comment s'établit la construction d'une identité professionnelle hybride entre ingénierie et expertise en mégadonnées (*data scientist*) (1.c).

1.a. Bâtir un projet d'IA : velléités d'automatisation multi-échelles

Par où entre l'IA dans les organisations ? Les promesses de l'IA, comme nous avons essayé de le montrer dans les précédents chapitres, semblent avant tout viser les décideurs des entreprises. L'examen de ces promesses ne suffit cependant pas à faire le lien entre une représentation positive et un déploiement effectif. Nous montrerons dans cette sous-section que le déploiement de l'IA découle essentiellement d'une volonté d'augmenter la productivité et l'efficacité de l'organisation industrielle. Néanmoins, il est nécessaire d'affiner la description car l'on ne peut réduire le déploiement de l'IA à une simple quête d'automatisation. Les trajectoires de ces systèmes montrent en effet des parcours nuancés dans l'organisation, promus de façon tantôt ascendante (par la base des salariés vers l'ensemble de l'organisation), tantôt descendante (par le haut management vers ses salariés).

Une intégration ascendante de l'IA ?

Le sociologue Y. Ferguson a eu l'occasion, au début des années 2020, d'observer de nombreuses situations d'usage de l'IA en contexte professionnel, dans des secteurs divers, au cours des enquêtes menées au sein du LaborIA. Il se plaît parfois à rappeler que la plupart des systèmes d'IA (générative ou non) sont en fait introduits par les salariés eux-mêmes[233]. Un sondage paru en 2023 montre effectivement que sur les 28% de salariés qui utilisent alors l'IA générative, plus de la moitié d'entre eux le font sans l'accord explicite de leur employeur (Salesforce 2023). C'est un usage que Y. Ferguson qualifie de « clandestin » : il est silencieux, la hiérarchie n'en est pas informée. Des observations plus concrètes, dévoilées dans un récent rapport qu'il a diligenté, montrent qu'il s'agit de « pratiques bricolantes et tactiques » faites d'expérimentations et d'ajustements (Ferguson 2025a:23). Pour les salariés, c'est un secret à garder, car l'IA peut permettre d'accroître la productivité sur certaines tâches, d'autant que son usage est commensuré aux pratiques individuelles de travail du salarié-utilisateur. Ne pas en parler à la hiérarchie serait, en un sens, un moyen de profiter des bénéfices apportés par un système capable de gérer des tâches complexes, sans encourir de risques.

Au-delà des problèmes liés à la diffusion de données sensibles, cette pratique peut générer un inconfort entre sentiment de triche, peur de la découverte ou d'une sanction, ou émergence de nouvelles exigences de performance (Ferguson 2025b). Ces dernières résulteraient d'un processus de rationalisation qui intègrerait désormais l'automate – son utilité ayant été démontrée par l'usage caché. La charge productive pesant sur le salarié pourrait alors être augmentée par sa hiérarchie, à la manière d'un effet rebond technologique (*la même tâche consomme moins de temps, on peut donc en faire faire plus*).

Cette pratique « d'IA fantôme » (*shadow AI*) (Mollick 2024) concernerait plutôt les salariés dont une grande partie du travail est à réaliser sur ordinateur, et porterait sur la production et l'analyse du langage : rédaction de mails et de rapports, assistance à la lecture de documents. Elle est une façon pour eux de conserver la maîtrise des moyens par lesquels ils souhaitent réaliser leur travail et de diminuer la charge que celui-ci représente.

[233] Notre souvenir date précisément du 17 octobre 2024 lors de la 2ème journée d'étude « Intelligence artificielle et travail. Quels enjeux pour les travailleurs et les travailleuses ? » organisée par l'association Le Fil Rouge, l'Institut d'Etudes Sociales et la Faculté d'Economie de Grenoble.

L'IA serait-elle alors une technologie intégrée de façon ascendante (*bottom-up*) dans les organisations, pour résoudre les besoins des salariés ? Le cas du ClassifiMotif semble de prime abord le confirmer.

Genèse d'un projet d'IA

L'histoire du ClassifiMotif débute par un mail, en 2021. C'est Claude, ingénieur qualité qui a pris sa retraite au cours de notre étude, qui la raconte[234]. Ce mail est envoyé par une autre équipe de contrôle, en aval du processus de production des plaques. Elle alerte sur un lot défectueux repéré tardivement dans le processus de fabrication. Le message perturbe Claude, qui exprime sa frustration vis-à-vis d'un sentiment de faillite du service Qualité à saisir tout un ensemble de problèmes qualité. Il y voit un décalage entre sa vision de la qualité et ce qui est réellement effectué. De ses propres mots, cela le pousse à l'action. Il en discute avec son manager direct qui l'encourage à aborder le problème, d'abord de façon officieuse, en lui libérant du temps de travail. Claude estime que son statut de senior et la reconnaissance de ses compétences l'ont aidé à être encouragé dans ce projet : « Ton chef s'il y croit, il t'alloue du temps ».

Cette pratique « d'innovation camouflée » (*bootlegging*[235]), elle aussi ascendante, est à distinguer de l'IA fantôme dont nous parlions précédemment. Y. Masoudnia (2012) a consacré sa thèse au sujet de l'innovation camouflée, difficile à évaluer puisqu'elle concerne, par définition, des pratiques cachées. Les salariés peuvent s'engager dans ce type d'entreprise – parfois sous couvert de leurs managers directs – pour des raisons différentes : apport de preuve de faisabilité avant dévoilement, intelligibilité du projet pour les interlocuteurs en interne, réduction de l'incertitude, démonstration d'une demande en mobilisant les clients, évitement d'une pression psychologique (2012:212). La suite de l'histoire du ClassifiMotif montre en effet qu'un certain nombre de contraintes pèsent sur ce type de projets d'innovation.

En quête des motifs

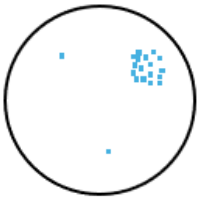
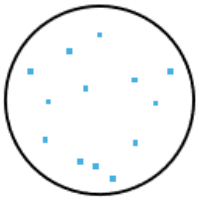
Claude se tourne vers l'IA pour le traitement d'images, des méthodes encore peu mises en pratique dans l'industrie mais qui commencent à être discutées en interne. Elles lui semblent pertinentes pour réaliser des activités de traitement d'image. Son objectif, au cours du développement du ClassifiMotif, est de repérer des cas de figure qui ne sont jusqu'à présent pas pris en compte par le service Qualité. Lorsqu'il commence son projet, l'essentiel des alertes est réalisé sur la base d'un décompte des défauts. Si ce nombre dépasse un seuil, une alerte qualité est déclenchée. Or, le cas rapporté par mail à Claude lui permet de constater que dans certaines configurations, la densité surfacique de défauts est faible au global, mais importante localement. On dira alors que la plaque présente un « motif » de défauts. Ces situations, pas si rares, constituent un angle mort du service Qualité. Elles sont généralement repérées tardivement, lorsque les défauts se sont accumulés ou, dans le pire des cas, lors des tests chez les clients. Le ClassifiMotif est supposé s'ajouter à l'arsenal des dispositifs d'alerte existants, et non pas à s'y substituer, voir (Figure 36).

Lors de ses premières investigations, Claude constate que des réflexions similaires sont en cours dans d'autres services Qualité de SemiCorp, au sein de sites que nous appellerons FrancoSite et EuroSite, situés respectivement en France, et dans un autre pays européen. Claude prend contact avec des

[234] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2023.

[235] Les anglophones parlent de *bootlegging* en référence au trafic d'alcool clandestin pendant la Prohibition.

ingénieurs de ces services, qui suivent deux approches différentes pour la conception de leur propre système de classification d'images de motifs. EuroSite alimente sa base de données avec des exemples réels, issus de prise d'images de la production, là où FrancoSite recrée des échantillons synthétiques, dessinés sur logiciel.

Cas de figure	**Densité de défauts** : forte **Motif** : non	**Densité de défauts** : faible **Motif** : oui	**Densité de défauts** : faible **Motif** : non
Avant déploiement du ClassifiMotif *Détection par la quantité de défauts*	OUI ⇨ **Alerte.**	NON ⇨ **Pas d'alerte.**	NON ⇨ **Pas d'alerte.**
Après déploiement du ClassifiMotif *Détection par la quantité de défauts* *Détection par le ClassifiMotif*	OUI NON ⇨ **Alerte.**	NON OUI ⇨ **Alerte.**	NON NON ⇨ **Pas d'alerte.**

Figure 36 : Avant / après le déploiement idéal du ClassifiMotif.

Lors d'une cérémonielle annuelle de SemiCorp où sont réunis des salariés de plusieurs pays, l'équipe d'EuroSite présente son projet de système d'IA pour la classification de motifs. Celui-ci reçoit un écho favorable : le haut management est enthousiaste et une récompense est même décernée au projet. Un responsable innovation haut placé aurait même déclaré, d'après Claude, qu'il faudrait que tous les services Qualité de SemiCorp se dotent d'un système similaire. Cette effervescence génère de grandes attentes dans les services Qualité de l'ensemble des sites de SemiCorp. Seul problème : sur les trois sites, aucun des systèmes n'est terminé, aucun n'est en production. A FrancoSite, la récompense du site-collègue est accueillie avec une certaine amertume. Le système d'IA n'est pas fonctionnel, mais les bravos reçus par les innovateurs d'EuroSite lors de la cérémonie font peser une pression sur l'ensemble des responsables de projet des trois sites, y compris à FrancoSite, où les équipes n'ont rien promis. Il leur est demandé d'accélérer.

A ThèseSite où nous avons réalisé notre enquête, dans un contexte d'augmentation planifiée de la production, la possibilité d'une détection accrue et automatisée de certains problèmes qualité jusqu'ici survolés est également perçue comme une aubaine. Claude rend ainsi compte d'un changement de ton au cours de son travail de conception. A son stade exploratoire, il est soutenu par son manager direct qui lui alloue du temps pour le réaliser. Mais une fois le système d'EuroSite présenté à l'organisation lors de la cérémonie, il ressent désormais une certaine pression venue du haut management pour accélérer le processus, lui reprochant une certaine lenteur.

Lorsque Claude prend sa retraite fin 2022, c'est Jérôme, jusqu'ici responsable de la conception du CatégoDéfo, l'autre système évoqué à la fin du précédent chapitre, qui reprend les manettes à ThèseSite. A ce stade, le ClassifiMotif n'est toujours pas déployé en production (bien qu'il y soit relié, de façon à pouvoir l'analyser sans avoir d'effets concrets sur la ligne de production). C'est à ce moment que, sous la responsabilité de Régis, l'équipe IA est créée dans le service Qualité. Le but affiché est de recourir à l'IA, mais plus largement à des systèmes informatiques, pour automatiser des tâches spécifiques du service. Le ClassifiMotif, en cours de développement, devient rapidement l'étendard de l'équipe IA. En

novembre 2022, Jérôme me confie qu'il reçoit lui aussi une « pression de malade » de la part du haut management pour déployer le système, ce qu'il trouve d'autant plus frustrant que l'amélioration du système s'avère difficile. L'intégration ascendante est devenue descendante, elle est imposée aux ingénieurs, dans des délais courts.

Montée-descendante

L'exemple du ClassifiMotif est intéressant car il montre une relation entre intégration ascendante et intégration descendante du système d'IA. La solution n'a pas été imposée aux salariés d'emblée, elle est d'abord venue d'ingénieurs et de managers attachés à améliorer la qualité de leur travail par le biais de nouveaux moyens technologiques. Travaillant de façon plus ou moins cachée, Claude souhaite initialement contribuer à l'organisation ainsi qu'à sa propre satisfaction d'un travail bien réalisé tout en valorisant ses compétences.

Une fois preuve faite du potentiel du ClassifiMotif auprès de la hiérarchie, désormais « intéressée » par le projet au sens de M. Callon (1986), la dynamique s'inverse, et les ingénieurs sont poussés à avancer et à déployer au mieux, au plus vite. Ce mécanisme a déjà été commenté par N. Alter (2013:121) dans son livre *L'innovation ordinaire* : « Le processus créateur sur lequel repose une innovation ne peut […] jamais être décrété. Il se développe largement par l'intermédiaire de petits innovateurs, à la fois déviants et sensibles aux questions de l'efficacité. Mais ce processus est toujours, provisoirement, "rattrapé", "borné", ou transformé en institution par les directions. En la matière, elles ne peuvent gouverner qu'en aval. » Le déploiement du système passe d'une logique ascendante (*bottom-up*) impulsée par les « petits innovateurs » que sont les ingénieurs du service Qualité vers une logique descendante (*top-down*), systématisée par l'entreprise, suite, voir (Figure 37).

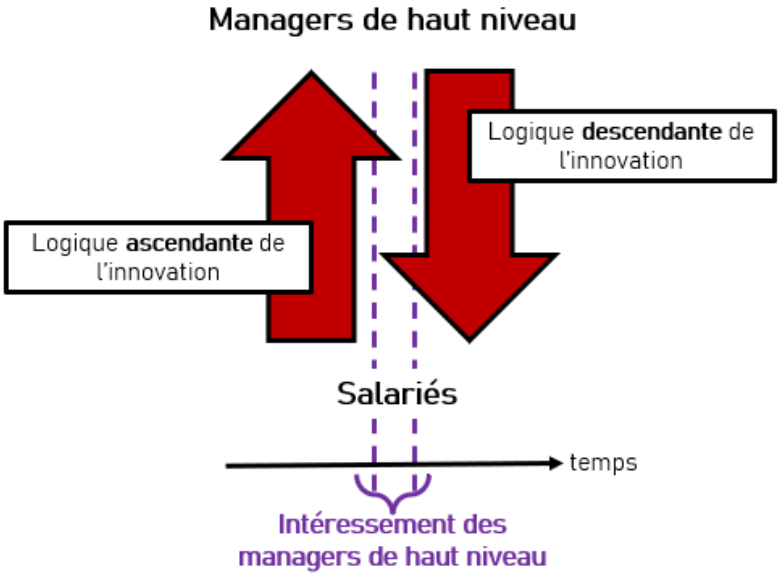


Figure 37 : Variation temporelle dans les logiques d'intégration des technologies.

Où est le *bottom* du *bottom-up* ?

Le principe d'une intégration ascendante suggère que les solutions viendraient d'un *bottom*, c'est-à-dire du bas de la hiérarchie[236]. Si le développement camouflé du ClassifiMotif semble d'abord suivre cette voie, il est tout de même le fruit du travail d'ingénieurs qui disposent d'une certaine souplesse dans l'organisation de leur temps de travail. Ils peuvent l'allouer, si les circonstances le leur permettent, à la réalisation de projets, de sorte qu'il leur est possible de s'extraire du flux productif et de ses contraintes. Ces pratiquent restent à la discrétion de leur hiérarchie de proximité.

Tous les salariés n'ont pas cette – relative – liberté. Prenons par exemple les techniciens de la salle blanche. Bien qu'ils ne soient pas explicitement subordonnés aux ingénieurs des bureaux, ils sont largement considérés comme des exécutants, qui doivent suivre les directives données par les supports[237]. Contraints par la nécessité de « vider la baignoire » en continu au sein du flux productif, ils disposent d'une marge de manœuvre restreinte. En pratique, celle-ci se caractérise par la mise à disposition d'un forum sur lesquels ils peuvent poser des questions, voire soumettre des suggestions, aux ingénieurs de l'équipe Suivi Temps Réel. La marge de manœuvre temporelle des techniciens est bien insuffisante pour contribuer à des innovations technologiques.

Le déploiement des technologies n'est ainsi ascendant qu'à partir d'une certaine hauteur, d'un palier. En revanche, la logique descendante intègre, elle, l'ensemble de l'organisation. L'encouragement des ingénieurs du service Qualité à concevoir des systèmes d'IA se double d'une volonté de les faire utiliser par les techniciens en salle blanche.

La gestion du temps alloué aux salariés ne peut pas, en réalité, permettre un déploiement purement ascendant de tels systèmes d'IA. Seuls des usages partiels, liés à des outils disponibles pour le grand public, déjà conçus par avance (et donc génériques), peuvent être mis en pratique par les salariés de façon isolée. On retrouve là le pendant organisationnel de l'un des arguments de L. Winner (1980) sur la structure politique nécessaire au déploiement de certaines technologies. L'infrastructure matérielle nécessaire à l'usage de l'IA pour des applications spécifiques, en interne, est déjà conséquente – nous allons y venir – et se double d'une autre contrainte relative à la structure organisationnelle, qui doit permettre de libérer du temps et des ressources. Autrement dit, le soutien de l'organisation au développement de l'IA est une condition nécessaire au déploiement de ces systèmes.

Une intégration centrée sur la direction ?

Et en retour, que soutient le déploiement de l'IA ? L'enquête d'A. Henriksen dans une entreprise qui conçoit des systèmes d'IA pour différents secteurs (comptabilité, santé), cette fois-ci en collaboration avec L. Blond (2023), est particulièrement éclairante. Les deux chercheurs décrivent le cheminement de

[236] Cela étant dit, dans la littérature, des approches sont parfois considérées comme ascendante, même lorsque la recherche de besoins est orientée par la direction vers ses subordonnés, par exemple (Brunnbauer 2023).

[237] En témoignent les nombreuses réunions lors desquelles des ingénieurs informent les techniciens de changements à venir (l'inverse ne se produit jamais), ou la vérification unilatérale des rapports d'analyse. V. Blanc-Brude et C. Defélix (2023:55) ont rapporté que les opérateurs de production en salle blanche se considéraient comme au service des « supports » situés dans les bureaux, un constat que nous partageons dans le service Qualité, même s'il pourra être nuancé.

pensée des développeurs de la firme investiguée. Ceux-ci réalisent, au fur et à mesure des projets dans lesquels ils sont embarqués, que leurs véritables clients ne sont pas les comptables des entreprises clientes – futurs utilisateurs du système – mais les directeurs financiers (Henriksen et Blond 2023:745-46). Pour les clients, la réduction des coûts prévaut sur l'amélioration de la qualité du travail.

Dans l'étude, ce constat amène les développeurs à se concentrer sur les demandes des managers, en laissant de côté les problématiques exposées par les comptables. Ils sont également portés à considérer que les contraintes financières guident de la même façon tous leurs clients, qu'il s'agisse d'un cabinet de comptabilité ou d'un hôpital. Dans leurs projets avec des hôpitaux, les développeurs communiquent dès lors exclusivement avec les directions plutôt qu'avec les soignants. Pour les auteurs, les systèmes d'IA ne servent pas aux professionnels à travailler plus efficacement, mais plutôt à soutenir l'institution afin que son fonctionnement soit moins coûteux et plus efficace. Dès lors, les développeurs procèdent à l'accompagnement de l'organisation pour améliorer son efficacité, en collaborant essentiellement avec les managers. Ces observations conduisent A. Henriksen et L. Blond à remettre en question le paradigme de systèmes d'IA centrés sur l'humain (*human-centered AI*) pour insister sur la façon dont ils sont centrés sur les dirigeants (*executive-centered AI*).

Qu'en est-il à SemiCorp ? Nous l'avons montré dans le chapitre précédent, deux promesses y cohabitent, celle de l'efficacité économique, et celle de l'amélioration des conditions de travail. Peut-on faire d'une pierre deux coups en remplissant les deux objectifs à la fois, de sorte à ce que l'IA soit centrée sur tout le monde à la fois ?

Du point de vue des managers, ça n'est pas certain. Nous assistons par exemple à une réunion « Priorités et automatisation[238] » réunissant Grégory, l'un des managers du service Qualité, ainsi que plusieurs de ses ingénieurs. La réunion a pour but de soumettre et prioriser des mini-projets internes d'amélioration des processus de travail, par une méthode proche des « murs d'idées » virtuels (Boboc 2021). Les participants ont glané des propositions d'automatisation auprès de leurs collègues, inscrites sur des post-its virtuels, et cherchent à les positionner sur un plan selon deux axes : (1) gain de la solution (faible,

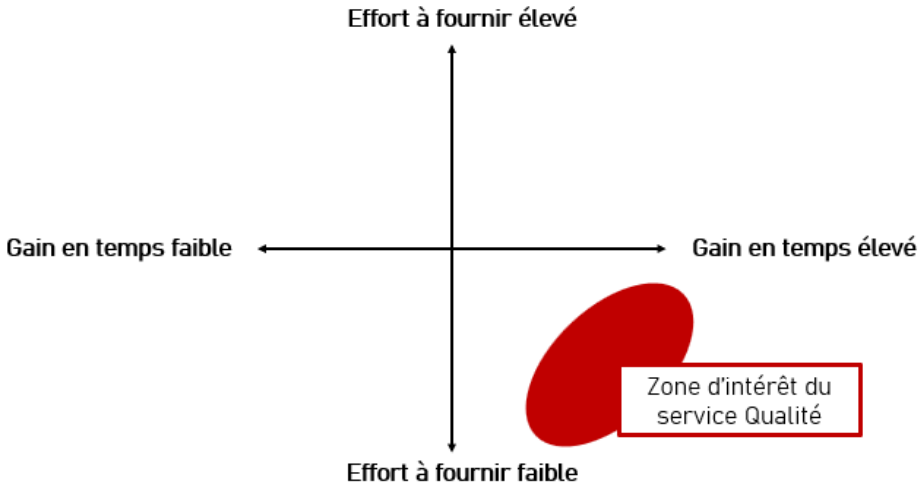


Figure 38 : Cadre théorique de la réunion « Priorités et automatisation » du point de vue de ses participants.

[238] La situation décrite a lieu en mars 2023. Le nom de la réunion est le nôtre, il sert à la positionner et à la rappeler dans la suite du texte.

moyen, fort ?), et (2) effort pour la mettre en place (facile, difficile ?). L'objectif est d'identifier les pistes de solution qui feraient gagner le plus de temps au service, avec le moins d'effort possible, voir (Figure 38).

L'une des suggestions débattues concerne la reclassification des résultats du CatégoDéfo. Que signifie reclassifier ? Préalablement à l'analyse d'un problème qualité donné, les techniciens en salle blanche classent les défauts présents sur la plaque. Pour les machines sur lesquelles le CatégoDéfo est installé, le logiciel effectue cette classification à leur place, mais ils peuvent malgré tout *reclassifier*, c'est-à-dire contredire le résultat du système d'IA pour en mettre un autre, lorsqu'ils constatent une erreur.

Une des personnes présentes préconise d'empêcher les techniciens de reclassifier : « Quand tu vois que l'opérateur merde une fois sur trois tu te dis ça vaut le coup d'éviter la reclassification. » La proposition revient à faire primer le résultat du système sur l'analyse du technicien. Les techniciens ne pourraient pas contredire le système. Mais la sortie ne fait pas l'unanimité parmi les ingénieurs. Elle n'est de toute façon pas envisageable sur le plan technique car même si le CatégoDéfo a été développé en interne, les logiciels sur lesquels il est installé sont des logiciels propriétaires, possédés par des entreprises extérieures, qui ne sont pas modifiables à l'envi. Grégory, manager du service Qualité conclut alors : « Aujourd'hui la vision c'est que c'est l'opérateur qui vérifie ce que fait le CatégoDéfo. A terme y'aura plus rien. » Le sous-texte, confirmé par la suite de l'échange, est assez clair : les techniciens n'auront plus à vérifier, car la tâche sera simplement automatisée. D'ailleurs c'est le cas d'autres tâches, comme la rédaction des rapports, là encore rédigés par les techniciens, et relus dans les bureaux (ou par d'autres techniciens si le lot revient dans le service Qualité). Il est prévu par le service d'embaucher des stagiaires ingénieurs pour élaborer des dispositifs de rédaction automatisée de ces rapports à long-terme. En ce sens, le constat d'A. Henriksen et L. Blond semble trouver ici une illustration dans le monde industriel, où, pour les managers tout du moins, les systèmes d'IA devraient avant tout répondre aux besoins de rationalisation de l'organisation.

A SemiCorp, le déploiement des systèmes d'IA auprès des techniciens est perçu par les managers comme une étape de transition vers une automatisation plus complète du travail réalisé, dans la continuité de l'automatisation des tâches par la numérisation des procédés de travail. Les managers de proximité sont encouragés, dans leur travail de numérisation, à poursuivre les logiques productives de l'organisation (Benedetto-Meyer et Boboc 2019). Pourtant, l'équipe IA, qui doit convaincre les techniciens, n'est elle-même pas convaincue de la vraisemblance d'un scénario qui supposerait une perfection technique, qu'elle estime inatteignable. Et si le déploiement de l'IA reste « *executive-centered* » il n'empêche que les ingénieurs peuvent reprendre à leur propre compte les objectifs de l'entreprise, tout en tâchant de faire au mieux pour satisfaire les techniciens.

1.b. Mettre à profit une infrastructure technique de la donnée

Des mégadonnées à l'IA

Le déploiement des systèmes d'IA bénéficie du terreau fertile qu'ont pu aménager les mégadonnées (*Big Data*) dans les années 2010. Les entreprises ont réalisé qu'elles disposaient, en puissance ou en actes, de précieuses ressources pour l'organisation : les données. R. Kitchin (2025), l'un des piliers des études critiques sur les données (*critical data studies*), propose de les définir comme « des mesures représentatives de phénomènes, capturées par la mesure ou l'observation, ou comme des valeurs dérivées ou inférées produites à partir de calculs statistiques ou de modélisation[239]. » Elles prennent de nombreuses formes : nombres, symboles, mots, et agencements de tous ces derniers.

La collecte de plus en plus massive de données a été facilitée par la mise à disposition de capteurs et d'équipements de moins en moins chers, qui permettent de les récupérer plus rapidement[240], en plus grande quantité, et de façon plus variée (McAfee et Brynjolfsson 2012). En dépit de cette abondance matérielle, le passage des données aux mégadonnées ne se fait pas seulement au travers la massification des données. Autrement dit, les mégadonnées ne sont pas juste une méga-quantité de données. Comme le souligne D. Beer (2016), les mégadonnées (comme l'*Industrie 4.0*) représentent un cadrage discursif particulier d'un phénomène sociotechnique, qui participe à son intégration dans le champ social. Par exemple, elles ont un temps été associées à un idéal d'objectivité et de précision, sous l'hypothèse qu'avoir plus de données, c'est connaître mieux (boyd et Crawford 2012). Cette position a reçu une réponse des études critiques sur les données, qui voient l'idée d'une donnée brute comme un contre-sens (Gitelman 2013). Les données sont produites et interprétées dans un contexte sociotechnique, et même culturel, dans lequel un sens particulier leur est attribué. B. Latour (2007) suggère de les appeler des « obtenues ».

Données et industrie

Dans l'industrie, les données ont désormais une valeur capitale, à tel point qu'il est nécessaire de les protéger. C'est tout particulièrement vrai dans l'industrie de la micro-électronique où, comme nous le relatons dans le chapitre précédent, les données de production peuvent permettre d'inférer des quantités produites, et donc jouer sur la valorisation boursière des entreprises. Plus largement, les processus de contrôle basés sur des données de production ont cherché, dès les années 1990, à répondre à plusieurs problématiques : amélioration des rendements (notamment pour les nouveaux produits, possiblement les plus rentables, dont le rendement doit augmenter le plus vite possible), réduction des déchets, optimisation maximale dans un marché compétitif (Moyne et Iskandar 2017).

Là où les données pouvaient auparavant être perçues comme des sous-produits des systèmes d'informations des entreprises, elles constituent désormais une ressource à leur service (Trabucchi et Buganza 2019), et même une richesse, voir (Figure 39). Un rapport d'une entreprise qui vend des logiciels

[239] « Representative measures of phenomena captured through some form of measurement or observation, or derived or inferred values produced through calculations such as statistics or modelling » (notre traduction).

[240] Une caractéristique qui fait par exemple dire à Kitchin (2014b) que les données de recensement, bien que massives, sont récoltées à des faibles fréquences et ne constituent pas vraiment des méga-données.

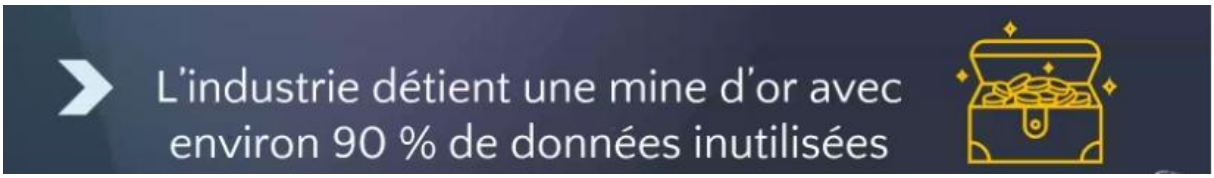


Figure 39 : Extrait d'une présentation d'une startup qui conçoit des dispositifs de maintenance prédictive à partir de données de capteurs issues de machines. Les données y sont valorisées comme « de l'or ».

d'analyse de données qualifie ainsi de « données obscures » (« *dark data* ») toutes ces données produites, inexploitées mais potentiellement porteuses de valeur (Splunk 2019). La perception de l'importance des données conduit certaines entreprises à collecter et structurer leurs données *au cas où* et à s'interroger, *a posteriori*, sur la façon de les valoriser. Un paradigme de la production conduite par les données (« *data-driven* ») a ainsi émergé (Tao et al. 2018). Les données fournissent des indicateurs qui permettent d'évaluer le processus de production et de donner des pistes d'action à suivre.

Les données dans le service Qualité

Le service Qualité de SemiCorp repose largement sur la production et l'analyse de données. Les inscriptions produites sont exhaustives et variées. Pour un lot donné, tracé par un numéro de code, l'intégralité des centaines d'étapes de fabrication par lesquelles il est passé (et passera) est consultable. Il est possible de savoir par quelles machines (elles-mêmes tracées) transite chaque lot et à quelle heure. Lors du passage dans l'atelier de qualité, de nouvelles données sont produites : les images d'inspection (en images visibles, pour détecter la présence de défauts) et de revue (par microscopie électronique, pour voir les défauts un par un). Les techniciens eux-mêmes produisent de nouvelles données en rédigeant leur rapport d'analyse, qu'ils transmettent aux ingénieurs des bureaux.

Les données alimentent la connaissance des salariés de l'activité au jour le jour du service Qualité. Des indicateurs sont présentés quotidiennement pour donner à voir le nombre de lots traités la veille, aussi bien en salle blanche que dans les bureaux. Les ingénieurs des bureaux se rendent chaque jour en salle blanche, chacun leur tour, pour récupérer les informations nécessaires à l'alimentation d'un PowerPoint qui sera ensuite présenté à toute l'équipe en début de journée. Ces indicateurs objectivés sont accompagnés de notifications d'arrêts de machine, de problèmes de qualité en cours. Le tout forme un ensemble hétérogène d'informations qui renseigne sur l'état du service Qualité au travers d'une quantification de sa performance et d'une qualification des problèmes à résoudre ou des contraintes du jour.

Toutes les données ne sont pas stockées virtuellement. Malgré la numérisation quasi-totale du processus d'analyse, Julia, technicienne expérimentée, tient beaucoup à son carnet papier. Elle y note systématiquement les numéros des lots qu'elle traite, accompagnés d'informations contextuelles supplémentaires. Son but : pouvoir s'en rappeler dans le cas où elle serait contactée par un ingénieur qui demanderait des précisions ou des justifications sur l'une de ses analyses. Tout n'est ainsi pas contenu dans les données. Nous observons d'autres techniciens utiliser leur carnet comme un outil de mémorisation temporaire, notamment lorsqu'il faut transcrire certaines informations d'un logiciel à un autre sans possibilité d'effectuer un copier-coller. Ces pratiques rappellent les travaux de M. Lewkowicz et R. Liron (2019) qui ont enquêté sur la mise en place d'un registre numérique inter-sites. Les auteurs font le constat d'une persistance de l'utilisation du registre papier. Ces expériences questionnent

l'interopérabilité des données et des logiciels, c'est-à-dire la compatibilité entre les différentes sources de données, les différents logiciels utilisés. C'est un aspect crucial dans la mise en œuvre des mégadonnées dans l'industrie (Kadadi et al. 2014). Comme le montrent M. Lewkowicz et R. Liron, ces problématiques de non-utilisation de nouveaux systèmes numériques ne peuvent cependant pas être réduites à des questions techniques. Les manques de formation et de prise en compte des pratiques existantes de documentation contribuent au maintien de techniques préalables, même lorsqu'elles sont jugées plus rudimentaires.

Un carburant nécessaire de l'apprentissage machine supervisé

Dans l'équipe IA, la conception des systèmes dépend fortement des données. L'entraînement des systèmes, en particulier repose sur « l'ingestion » (c'est le terme utilisé en interne) de la base de données idoine. Celle-ci contient un ensemble de fichiers « KLARF », pour *KLA Result File*, du nom de l'entreprise KLA, acteur majeur de la métrologie du semiconducteur. KLARF est un format de fichier particulier (au même titre que PDF ou PNG), spécialement conçu pour rendre compte des défauts présents sur une plaque de silicium, voir (Figure 40).

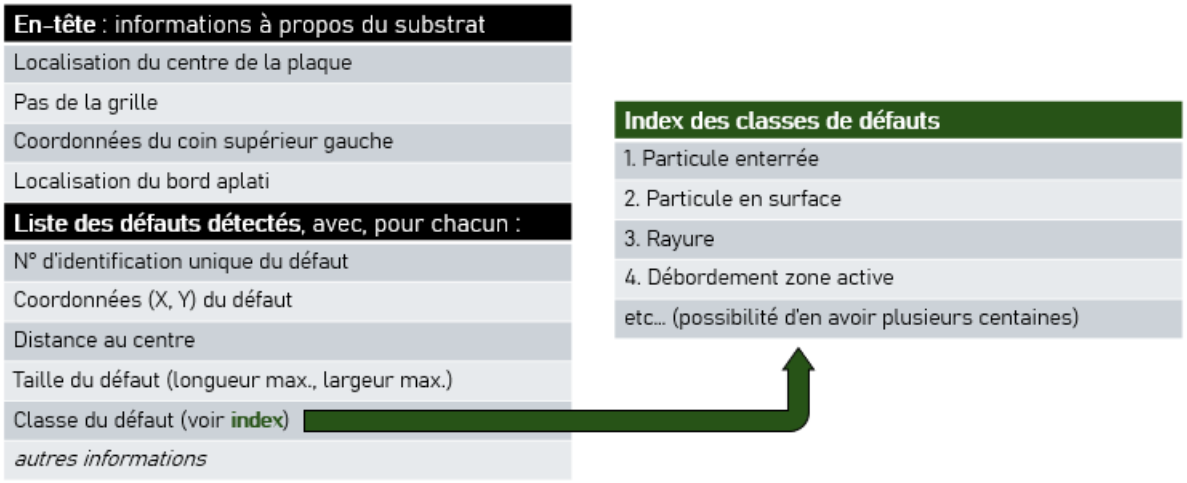


Figure 40 : Structure et informations présentes dans un fichier KLARF. Le schéma est une synthèse d'un tutoriel présenté par la société Artwork (*https://artwork.com/package/wmapconvert/map_formats/KLARF/index.htm*).

A l'aide d'un logiciel adapté, l'un de ces fichiers peut être ouvert pour observer la cartographie des défauts présents sur une plaque. Les KLARF sont générés à la suite de chaque prise d'image d'inspection et sont donc produits par milliers chaque jour. Un nombre important de méta-données (des informations portant sur la donnée) sont accessibles et permettent de contextualiser les informations données par le fichier KLARF[241] : numéro du lot, numéro et type de la plaque, localisation et date de la prise de vue, machine d'inspection concernée, liste des coordonnées des défauts. Ces méta-données révèlent en fait toute la complexité inhérente à la production de ces données : sans machine d'inspection (coûtant plusieurs dizaines de millions d'euros), ni réseau centralisé, ni serveurs de stockage, il ne serait pas possible de

[241] Les méta-données regorgent d'informations intéressantes. Celles qui émanent de la navigation sur Internet des internautes constituent par exemple une manne financière importante. Les géants du numérique exploitent les méta-données relatives à leurs consommateurs pour en tirer un bénéfice en les revendant auprès des publicitaires (Van Dijck 2014).

produire ces données et, à plus forte raison, de les exploiter. L'ensemble constitue un palier à l'entrée d'autant plus difficile à dépasser pour des petites ou moyennes entreprises.

Pour des projets techniques d'ampleur, le déploiement de l'IA non générative ne peut ainsi se faire sans une infrastructure matérielle conséquente. Ces facteurs peuvent partiellement expliquer la relativement lente pénétration des technologies d'IA non générative dans l'industrie, en plus des problématiques liées à la disponibilité des compétences pour les mettre en l'œuvre.

1.c. Devenir expert en mégadonnées

D'ingénieur qualité à expert en mégadonnées[242], n'y a-t-il qu'un pas à franchir ? La question mérite d'être posée, car en devenant responsables de la conception de systèmes d'IA, les ingénieurs de l'équipe IA adoptent un nouveau rôle. Ils ne travaillent plus simplement *dans* le service Qualité : ils travaillent *pour* lui. Ce glissement est caractéristique de la transformation des relations de collègues à collègues, devenues relations de fournisseurs-clients (Alter 2013). Elles se concrétisent dans le recours au terme de « client interne », régulièrement employé par les membres de l'équipe IA, et qui a d'abord pu générer chez moi quelques confusions (*qui sont donc ces clients que les ingénieurs rencontrent sans jamais sortir du service ?*). Nous souhaitons dans cette sous-section développer ce point, en montrant comment l'introduction de nouvelles technologies s'accompagne d'un renversement du positionnement des ingénieurs IA-qualité dans l'organisation.

Identité des experts en mégadonnées

Avant de voir comment les ingénieurs qualité se muent en experts en mégadonnées, il nous faut observer la métamorphose inverse. En réalité, de nombreux experts en mégadonnées sont aujourd'hui initiés aux sciences computationnelles avant tout. Une étude de N. Avnoon (2021) auprès d'experts en mégadonnées israéliens (auto-identifiés comme des « *data scientists* ») montre qu'ils sont d'abord formés dans des disciplines associant traitement de données, informatique et calcul. N. Avnoon relève qu'ils doivent constamment se mettre à jour sur le plan technique, car les méthodes, technologies et logiciels utilisés évoluent en permanence. Leur appétence envers des domaines d'application variés des dispositifs de traitement de données est manifeste (médecine, psychologie, finance, droit). Ce sont des savoirs-experts qu'ils acquièrent en travaillant sur des applications techniques spécifiques, au fil des projets.

Pour ces experts en mégadonnées de formation, le traitement de données constitue le point de départ de leur expertise. Le savoir technique spécifique est acquis au fur et à mesure de leur trajectoire professionnelle. Comme nous le verrons, pour les ingénieurs qualité de l'équipe IA, c'est tout à fait l'inverse, voir (Tableau 6). Les ingénieurs qualité sont originellement formés en électronique et en qualité, et apprennent sur le tas la mise en pratique des sciences des données. Ce renversement est un marqueur de l'introduction de nouvelles « compétences numériques » (*digital skills*) dans le travail industriel, de façon transverse, sans être le seul apanage de spécialistes (Kohlgrüber et al. 2021). Des phénomènes similaires se sont produits avec la maîtrise progressive et (plus ou moins) collective de la bureautique informatique, de la circulation sur Internet.

[242] C'est ainsi que la Commission d'enrichissement de la langue française (2025) propose de traduire le terme de « *data scientist* ».

Cas	Auto-identification	Formation initiale	Compétences techniques développées lors du développement d'applications métier
(Avnoon, 2021)	Data scientists	Sciences des données	Expertise métier (droit, santé, finance…)
Notre étude	Ingénieurs de l'équipe IA	Expertise métier (électronique)	Sciences des données

Tableau 6 : Comparaison synthétique de notre étude avec celle de N. Avnoon (2021) sur le plan de la temporalité de l'acquisition de l'expertise technique.

Être concepteur d'IA : caractérisation par la tâche

Considéré comme un métier à part entière, l'ingénieur IA est chargé de plusieurs types de tâches, comme le révèle une étude qui analyse les offres d'emploi « d'ingénieur IA » (Meesters, Heck, et Serebrenik 2022) :

1. Développement logiciel non-IA (conception d'interfaces),
2. Développement de méthodes de traitement des données[243] (à l'aide de techniques d'IA mais aussi statistiques),
3. Exploration en lien avec les objectifs et besoins de l'entreprise (suggestions d'applications),
4. Ingénierie de la donnée (construction et maintenance de base de données),
5. Opérationnalisation des systèmes d'IA (déploiement dans l'environnement productif, vérification de la qualité des modèles).

Ces tâches sont assez vagues et ne peuvent pas être considérées comme prescrites : elles figurent sur des offres d'emploi et ne correspondent pas nécessairement à l'ensemble de ce qui sera réalisé en pratique par les personnes recrutées. Malgré tout, elles permettent de donner une idée de ce qui constitue la spécificité du travail de conception de l'IA. Mettre en parallèle cette nomenclature avec les activités réelles de l'équipe IA du service Qualité s'avère opportun pour détailler le contenu de leur travail[244]. Nous avons pu observer que ces tâches étaient effectivement réalisées dans le cadre du développement des systèmes d'IA, mais dans des configurations variées.

Déléguer le code, subir des dépendances au code

D'abord, ces tâches ne sont pas toutes réalisées par l'équipe IA elle-même. Typiquement, dans le cas du CatégoDéfo et du ClassifiMotif, le développement logiciel non-IA (1) est délégué à service Informatique interne, qui lui-même sous-traite parfois à des entreprises tierces (cabinets de conseil). Tout au long de l'année 2022, de nombreuses réunions sont organisées par le service Informatique pour assurer le suivi

[243] Nous proposons d'interpréter de cette manière le terme de « modélisation », parcimonieusement défini dans l'article.

[244] Notons bien que l'ensemble des activités de l'équipe IA ne tournent pas autour de l'IA et peuvent relever d'interactions formelles et informelles avec d'autres salariés du service Qualité, suivant les événements au jour le jour.

de l'amélioration de l'interface logicielle du ClassifiMotif, qui constitue un projet multisite. Pour le développement algorithmique (2), c'est la même chose.

Ce que cela signifie concrètement, c'est que les membres de l'équipe IA ne codent quasiment pas[245]. Ils ne rédigent ni ne voient d'algorithme d'apprentissage. De leur point de vue, la conception de l'IA est ainsi décorrélée de ce qui serait communément associé aux activités de programmation et de codage. Cet aspect est fondamental : un large pan de la conception de l'IA dépasse le cadre de la production informatique. Les tâches de traduction du problème initial en pseudo-code, puis de traduction de ce pseudo-code en code source dans un langage informatique spécifique, identifiées par les « *algorithm studies* » (Kitchin 2017), sont réalisées en dehors du champ du service Qualité.

Ces dépendances peuvent générer des frictions. Chaque nouvelle version du ClassifiMotif est générée à l'issue de l'exécution d'un algorithme d'apprentissage, lequel est exécuté en dehors du service Qualité par le service Informatique (ou ses sous-traitants). C'est lui qui ensuite est chargé d'ingérer les données, envoyées par l'équipe IA, pour générer le modèle qui est entraîné à partir d'elles. L'équipe IA n'a donc pas la main sur la modification du ClassifiMotif : chaque nouvelle version doit passer par le service Informatique. Cette contrainte à la fois technique et organisationnelle ralentit nettement la capacité de l'équipe IA dans ses essais, d'autant plus qu'elle est poussée par les managers du service Qualité à progresser rapidement.

Cette relation de dépendance pose aussi problème sur le plan de la temporalité de l'investissement des différents acteurs, comme l'explique un jour Jérôme qui raconte, passablement agacé : « Les développeurs de [l'interface du ClassifiMotif], ils ont fait la *release*, c'est bon ils sont passés à autre chose. Faut aller les rattraper […]. L'autre fois au service Informatique ils ont mis un mois à ingérer les nouveaux motifs[246]. » Ce que déplore Jérôme, c'est que le service Informatique envisage la première version fonctionnelle du système d'IA (la *release*) comme étant la conclusion du projet de conception. Pour l'équipe IA, elle ne constitue au contraire qu'un jalon du déploiement, car le système doit encore être mis à l'épreuve et perfectionné sur le long-terme.

IA ou pas IA ?

L'absence de la composante technique de programmation d'algorithme d'apprentissage dans le travail de l'équipe IA conduit à des discussions sur la nature « IA ou pas IA » des dispositifs sur lesquels elle travaille.

Lors de la réunion « Priorités et automatisation » que nous évoquions plus haut (**III.**1.a), un échange porte ainsi sur un nouveau post-it-solution. Il est écrit par un collègue du service Qualité qui suggère de procéder au « Développement d'outils d'IA pour [des usages spécifiques] ». Laurence, qui a récemment intégré l'entreprise pour travailler sur des applications logicielles, et qui est originellement issue du milieu académique, se questionne sur la nécessité d'utiliser des techniques d'IA pour l'usage suggéré par le post-it : « Je sais pas si c'est de l'IA. Moi IA, je vois mon réseau de neurones. ». Grégory, le manager du

[245] L'exception ne s'est manifestée qu'à partir de l'accueil d'un stagiaire ingénieur, lancé sur un projet exploratoire d'extraction automatisée de fichiers de procédures, et qui rédige et exécute effectivement du code sur Python.
[246] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en janvier 2023.

service Qualité répond avec un sourire : « Dès qu'il y a pas d'humain c'est IA […], après la distinction c'est pour les érudits. » Difficile de savoir s'il est sérieux[247], et peu importe après tout. Ce que souligne cette discussion, qui revient de façon relativement récurrente, c'est qu'il n'est pas clair si l'équipe IA fait de l'IA, ni même si elle doit faire de l'IA.

Les débats sur ce qu'est ou n'est pas l'IA, typiques des introductions d'ouvrages sur le sujet, trouvent un nouvel écho au sein du service Qualité. Le manque de clarté ne pose pas réellement problème pour Grégory car, IA ou pas, le but poursuivi est avant tout d'automatiser les tâches les plus coûteuses en énergie et en temps. En réalité, l'éventail de l'équipe IA est large. Elle produit aussi bien des dispositifs basés sur des systèmes apprenants que sur des scripts déterministes. Son critère de sélection des dispositifs repose sur leur adéquation avec un cadre organisationnel précis : celui de l'automatisation du travail.

Répartir le travail, multiplier les explorations

Les autre tâches proposées par le modèle de M. Meesters et ses collègues (2022) sont distribuées entre les membres de l'équipe IA. Régis, son responsable, aussi bien que les ingénieurs, sont impliqués dans l'exploration des nouvelles tâches à faire résoudre par l'IA (3), en animant par exemple des réunions sur le sujet. Leur but est par exemple d'obtenir de nouvelles idées pour des projets d'automatisation de tâches, de sorte à multiplier les pistes « d'exploration » (March 1991). L'ingénierie de la donnée (4) est quant à elle attribuée aux responsables des systèmes en interne (Jérôme puis Etienne sur le CatégoDéfo, Claude puis Jérôme sur le ClassifiMotif), bien qu'ils puissent ponctuellement collaborer sur certains sujets avec d'autres salariés du service Qualité. Ce travail de la donnée est sans conteste celui qui prend le plus de temps aux membres de l'équipe IA, nous le détaillerons dans la suite du chapitre. L'opérationnalisation des systèmes conçus (5) est quant à elle une mission collective, bien qu'elle soit essentiellement assurée par les différents responsables de systèmes. Les systèmes d'IA sont en effet améliorés en permanence. Sur le plan technique, la réalisation de projets d'IA dans l'équipe dédiée correspond finalement à un travail d'organisation des données, de « *data mining* » tel que l'appellation a commencé à se diffuser dans les années 2000 (Martinez-Plumed et al. 2021).

Travailleurs de la tech, travailleurs du numérique

Comment définir le statut des membres de l'équipe IA ? A les écouter, ce sont avant tout des professionnels de l'électronique, spécialisés dans la qualité. Bien qu'ils soient ici qualifiés d'ingénieurs et travaillent sur des techniques d'IA, les membres de l'équipe IA ne sont pourtant pas des « ingénieurs IA ». Etienne par exemple, nouveau responsable du CatégoDéfo, dispose d'un BTS Electronique et ne se qualifie lui-même pas d'ingénieur. Ayant commencé sa carrière à SemiCorp en salle blanche, il préfère le terme de technicien.

L'IA n'est pas le cœur de métier de l'équipe IA, elle en est un nouvel équipement, associé à de nouvelles compétences au service de la qualité. Les membres de l'équipe apprennent à s'en saisir au contact des systèmes sur lesquels ils travaillent. C'est la micro-électronique qui reste leur domaine d'expertise

[247] Nous n'avons pas eu l'occasion de l'interroger.

primaire. Plus qu'un facteur identitaire, la manipulation des mégadonnées est en réalité une compétence au service du travail réalisé dans le service.

D'une certaine façon, suggèrerait probablement R. Dorschel (2022), les ingénieurs de SemiCorp font partie d'une nouvelle génération de travailleurs du numérique (*digital workers*). Dans son article, R. Dorschel propose d'étendre la catégorie des travailleurs du numérique, historiquement associée aux prosommateurs[248] (*prosumers*) puis étendue aux micro-travailleurs (Irani et Silberman 2013), en l'élargissant considérablement. L'ensemble des salariés de la production, de la conception des systèmes numériques sont ainsi à inclure, selon lui, dans la catégorie des travailleurs du numérique. La mineuse de cobalt ? Travailleuse du numérique. Le vendeur de montres connectées ? Travailleur du numérique, ainsi que toutes celles et ceux qui se trouvent au milieu.

Les ingénieurs et techniciens de SemiCorp, participant à la conception et la fabrication des dispositifs micro-électroniques destinés à équiper les systèmes numériques en seraient aussi. Réunir dans une même catégorie analytique les mineurs et les ingénieurs rappelle que le travail des seconds est subordonné à celui des premiers. L'argument principal de R. Dorschel est que l'analyse de « l'économie du numérique » gagnerait à être enrichie par une vision systémique incluant l'ensemble de ses contributeurs.

Un travail invisible et peu valorisé

Si une telle inclusion prend le risque de perdre en finesse d'analyse sur les spécificités de tel ou tel secteur d'activité, elle a le mérite de mettre en lumière l'ensemble des ressources, des infrastructures, et somme toute du travail nécessaires à faire advenir les systèmes numériques. La matérialité des infrastructures numériques telles que les *data centers* est encore largement ignorée. Dans sa thèse qui porte sur la géopolitique du « *cloud* », C. Bômont (2023:96) montre que son invisibilité tient autant de sa fiabilité (*ça marche sans effort*) et de son ubiquité (*on peut y accéder de partout*) que d'une distanciation physique des utilisateurs avec les infrastructures du numériques, parce qu'elles sont délocalisées et externalisées auprès de prestataires infogérants.

Cette invisibilité concerne aussi les travailleurs des plateformes, en particulier ceux qui contribuent à alimenter les systèmes d'IA, parfois appelées les « petites mains de l'IA » en référence aux jeunes couturières débutantes, placées dans des positions d'exécutantes, dans l'industrie du textile dès le XIXème siècle. L'invisibilité de ces travailleurs est largement construite par la communication des entreprises qui ont recours à eux, et qui se gardent bien de les mentionner. Leur travail consiste à vérifier, entraîner, voire imiter la machine (Tubaro, Casilli, et Coville 2020). Une étude de cas marquante de C. Le Ludec, M. Cornet et A. Casilli (2023) décrit notamment le quotidien de travailleurs malgaches chargés d'annoter des vidéos prises dans des supermarchés afin d'entraîner un système de détection de comportement suspicieux, comme de vol. Or, les travailleurs sont parfois mis face à un flux vidéo en direct, de sorte qu'ils ne sont plus seulement des annotateurs, mais bien des vigiles à distance, à leur insu mais aussi à

[248] Le néologisme mélange producteur et consommateur. Il témoigne, dans le champ de la sociologie, d'une mise au travail croissante des consommateurs par les entreprises (Ritzer et Jurgenson 2010). Elle se caractérise par exemple par l'exploitation des données d'utilisation des réseaux sociaux vendues aux publicitaires, qui génère un profit important pour les plateformes numériques (Fuchs 2011).

celle des clients. Le travail est invisible, car il est dissimulé derrière un artéfact technique dont le fonctionnement est largement ignoré. Les systèmes d'IA sont utilisés comme nouveaux instruments d'une division internationale du travail.

Le travail de l'IA tel qu'il est effectué dans le service Qualité porte aussi des marqueurs d'invisibilité. Ce constat nous frappe encore une fois lors de la réunion « Priorités et automatisation ». L'un des post-it soumis par l'un des salariés du service propose d'explorer une piste : « Amélioration de la classification par le CatégoDéfo ». Il est lu par une ingénieure qui, semble-t-il ingénue, demande alors : « C'est difficile, ça ? » La question fait sourire les membres de l'équipe IA ainsi que Grégory, le manager du service Qualité, qui réplique alors : « Y'a juste des mecs à temps-plein depuis des années [sur ce sujet] ! »

Le perfectionnement continu du CatégoDéfo, qui occupe l'essentiel du temps de Jérôme puis d'Etienne, peut passer inaperçu. Des facteurs organisationnels sont bien sûr imputables à ce manque de visibilité : l'équipe IA présente plus souvent ses projets à venir que ses projets antérieurs, alors même qu'ils persistent à lui demander du travail. Pour autant, ces circonstances n'expliquent pas tout. Au-delà des métriques de performance qui permettent de le caractériser (nous y reviendrons dans le prochain chapitre), le CatégoDéfo reste un système de classification. Pour percevoir des changements de nature, il faut pouvoir apprécier ses résultats de classification de manière régulière, récurrente, avant et après les changements opérés. Autrement dit, pour percevoir le travail opéré sur le CatégoDéfo, il faut pouvoir en faire l'expérience sur le long-terme, ce que ne font pas la majorité des salariés du service Qualité. Contrairement à beaucoup de leurs collègues, les membres de l'équipe IA sont découplés du flux productif. Ils œuvrent à concevoir et améliorer des dispositifs infrastructurels dont les modifications (à moins d'être franchement erronées et d'induire des erreurs bien visibles), ne sont pas immédiatement perceptibles par les autres salariés.

Des experts déqualifiés ?

La nouvelle palette de responsabilités des membres de l'équipe IA ne constitue pas nécessairement un facteur d'épanouissement au travail. Si les ingénieurs peuvent exprimer de grandes satisfactions lorsque des jalons du projet sont dépassés (par exemple, le déploiement en salle du ClassifiMotif), ils nous font part, à plusieurs reprises, de leur désintérêt pour les tâches dont ils ont la charge, considérées comme peu stimulantes. Ce constat paraît converger avec les résultats de l'enquête d'A.-S. Mayer et F. Strich (2024), qui montrent une réception différenciée de l'IA dans les organisations, suivant le niveau de qualification. Toutes choses égales par ailleurs, les salariés plus qualifiés ont tendance, expliquent les auteurs, à considérer le recours à l'IA comme une menace pour leur identité professionnelle, plus que les autres. Ces résultats concernent d'abord l'usage de systèmes d'IA, mais devraient pouvoir être étendus à leur processus continu de conception – qui se double d'un usage tout aussi continu. Dans l'équipe IA, les ingénieurs formulent par exemple un sentiment d'inadéquation entre leur travail d'annotation des données, et l'idée qu'ils se font de leur propre travail. Nous proposerons justement, dans la suite de ce chapitre, de contextualiser et décrire ces pratiques épistémiques de gestion des bases de données.

Conclusion (III.1)

Le déploiement de l'IA vient se nicher dans une organisation existante, avec son propre mode de fonctionnement : il en adopte alors les contraintes, les canaux classiques d'innovation. Nous avons tenté de montrer de quelle façon il pouvait intervenir dans une grande entreprise comme SemiCorp. Si des premières propositions ont pu émerger des salariés eux-mêmes, la démonstration de la preuve de l'intérêt de ces systèmes a suscité, chez les décideurs, un mouvement inverse de systématisation des dispositifs d'IA. Celui-ci a nettement transformé les conditions dans lesquelles le développement de ces systèmes pouvait être réalisé. *In fine*, les objectifs des dispositifs technologiques introduits dans l'espace de travail sont déterminés par la hiérarchie, faute d'un espace collectif de débat et de négociation qui permettrait de faire valoir les intérêts de l'ensemble des acteurs de l'organisation.

Ces déploiements, on l'a vu, ne sont rendus possibles que par la présence d'une infrastructure technique massive, qui permet aussi bien de générer les données, de les structurer, que de les stocker pour les réemployer. Dans l'industrie du semiconducteur, le pilotage est de l'activité est fortement accompagné (voire guidé) par les données de production, qui permettent d'offrir du sens et une synthèse sélective de ce qui s'y joue heure par heure. Le caractère incontournable de cette infrastructure constitue mécaniquement une marche relativement haute pour les organisations, laquelle creuse encore l'écart entre petites et grandes entreprises. L'introduction de l'IA pour des tâches de classification, dans ce contexte, n'est possible que parce que les industries ont déjà engagé des démarches antérieures d'interconnexion des informations de production. C'est probablement l'une des grandes différences avec les systèmes d'IA générative, utilisés pour d'autres types de tâches certes, mais dont une grande partie de l'entraînement est déjà opéré par ses vendeurs.

C'est dans ce contexte que des professionnels de la micro-électronique, experts en qualité, se muent en experts en mégadonnées. Leur rôle dans l'analyse et la production de données les amène à assumer une place nouvelle dans l'organisation, dans une temporalité différente, découplée de la charge productive, mais en subissant des contraintes elles aussi nouvelles, relatives au bon déploiement des systèmes d'IA. Ces nouvelles responsabilités ne s'accompagnent pas nécessairement d'une mise en valeur sur le plan professionnel, aussi bien de leur propre point de vue que de celui de leurs collègues.

2. Concevoir un système d'IA : un travail épistémique de la donnée

Technologie épistémique…

L'IA constitue un ensemble de « technologies épistémiques » (Alvarado 2023)[249]. Pour préciser son propos théorique, R. Alvarado introduit plusieurs distinctions entre différents types de technologies. Il reprend à son compte le qualificatif « d'exhausteur épistémique » (*epistemic enhancer*) de P. Humphreys (2004) pour désigner des technologies qui pallient, pour des tâches spécifiques, les insuffisances épistémiques ou cognitives de leurs utilisateurs. R. Alvarado prend l'exemple du microscope, qui améliore notre capacité de voir, là où un bulldozer, apporte une assistance plutôt mécanique. D'autres dispositifs comme les calculatrices, ou même les équations et les représentations graphiques que l'on peut tirer d'elles, permettent d'étendre la capacité de leurs utilisateurs à calculer plus vite, à se figurer mieux le monde.

Qu'en est-il des systèmes d'IA ? Non content d'apporter par leurs résultats des éléments de savoirs à leurs utilisateurs (et donc d'être considérés comme des exhausteurs épistémiques à part entière), les systèmes d'IA, montre R. Alvarado, manipulent eux-mêmes du contenu épistémique (données textuelles, chiffrées, propositionnelles, catégoriques). Ils peuvent également procéder à des opérations épistémiques, en produisant des prédictions, des inférences. Ces deux caractéristiques (manipulation de contenu épistémique, réalisation d'opérations épistémiques) font des systèmes d'IA des technologies épistémiques particulières, des technologies que l'on dirait *complètement* épistémiques. Elles sont en interaction permanente avec des savoirs abstraits, qui les calibrent (par l'entraînement ou par construction[250]), qui les sous-tendent (algorithmes de calcul) et qu'elles génèrent (inférences).

L'argument de R. Alvarado cherche à caractériser les systèmes d'IA comme des systèmes techniques particulier du point de vue du savoir. Il lui permet de reconstruire les débats sur l'explicabilité ou la confiance en les systèmes d'IA à partir d'un cadre où le contenu épistémique délivré par le système d'IA doit être évalué, comme tout contenu épistémique, sur la base des raisons qui le justifient.

… demande travail épistémique

Si l'analyse philosophique de R. Alvarado est pertinente pour mieux comprendre la nature des systèmes d'IA en tant qu'actants de la production de savoirs, elle maintient un angle mort : la constitution de ces dispositifs. Si un système d'IA peut donner un résultat épistémique, c'est parce que des savoirs ont préalablement été structurés, catégorisés, qualifiés. Produire de l'IA inclut bien un travail qui porte sur le savoir, ce que S. Cook et J. Brown appellent un « travail épistémique » (*epistemic work*), c'est-à-dire « le travail qui doit être réalisé par un individu pour acquérir, confirmer, déployer ou modifier ce qui doit être su pour qu'il puisse faire ce qu'il fait[251] » (1999:399).

[249] Nous n'avons eu accès qu'à une version préliminaire de cet article, dont nous restituons l'argument principal.

[250] Il est ici fait référence à des systèmes d'IA symbolique qui ne sont pas entraînés grâce à des données.

[251] « the work people must do to acquire, confirm, deploy, or modify what needs to be known in order for them to do what they do » (notre traduction).

Cette perspective encourage à considérer le savoir non plus comme un acquis, que l'on peut posséder et transmettre – *knowledge*, suivant une « épistémologie de la possession » – mais plutôt comme une action, dynamique, située – *knowing*, au travers d'une « épistémologie des pratiques » – (Cook et Brown 1999). S. Cook et J. Brown, tout comme W. Orlikowski à leur suite (2002), rappellent la nécessité de l'expérience de l'action dans le processus d'apprentissage. W. Orlikowski parle ainsi de « savoir en pratique » (*knowing in practice*), une vision dans laquelle le savoir est inextricable de l'action dans laquelle il s'inscrit. Les indicibles « savoirs tacites » de M. Polanyi (1967), tels que ceux qui guident le laçage des chaussures, sont caractéristiques de cette manière d'envisager le savoir. Savoir, c'est faire.

Cette section cherchera à rendre compte de ce travail épistémique, réalisé au sein de l'équipe IA. Nous reviendrons d'abord sur les processus de conception de systèmes d'IA en décrivant en particulier les grandes étapes du travail de développement du ClassifiMotif (2.a). L'analyse portera dans un second temps sur les activités épistémiques majeures de la conception de bases de données (catégorisation, annotation, peuplement), en considérant différents modèles présentés dans la littérature (2.b). Au travers d'une chronologie de la base de données du ClassifiMotif, nous restituerons enfin sa cohérence interne en nous inspirant des travaux de sociologie de la classification (2.c). Nous y montrerons en particulier comment des activités épistémiques de catégorisation peuvent intégrer explicitement des formes d'organisation du travail.

2.a. Décomposer le travail de la base de données

Le développement des systèmes d'IA est largement décrit dans les littératures (qu'il s'agisse de sciences des données ou des sciences sociales) comme un processus séquentiel, étapes par étapes. Cette sous-section, aux ambitions théoriques, cherchera à l'envisager à la place sous le prisme d'une multitude d'activités, et notamment d'activités épistémiques, qui portent sur l'élaboration collective de savoirs partagés.

Schématiser la conception de l'IA

Il existe de nombreux modèles qui décrivent les processus de conception de systèmes de traitement de données. L'un des plus connus est CRISP-DM[252] (Shearer 2000), voir (Figure 41). C'est un modèle à l'ambition normative, qui se positionne explicitement comme un support didactique à l'attention des industriels qui chercheraient à valoriser leurs données, au tournant des années 2000. S'il a pu connaître des évolutions au cours des décennies (Haakman et al. 2021; Martinez-Plumed et al. 2021), le modèle CRISP-DM reste un incontournable (Schröer, Kruse, et Gómez 2021).

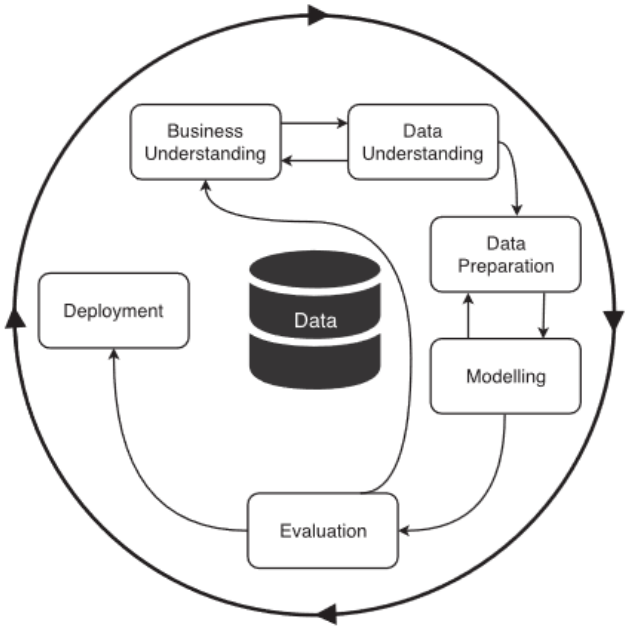


Fig. 1. The CRISP-DM process model of data mining.

Figure 41 : Modèle CRISP-DM (Martinez-Plummed et al., 2021)

Comme nous l'avons laissé entendre dans la première section, le travail de conception de système d'IA est avant tout, dans le service Qualité, un travail de conception de base de données[253]. Pour en rendre compte, il apparaît pertinent de présenter un modèle CRISP-DM récent, adapté à la conception de systèmes d'IA, voir (Figure 42).

[252] CRISP-DM pour *« CRoss-Industry Standard Process for Data Mining »*, que l'on peut traduire par « processus standard trans-industriel pour l'exploration de données ».

[253] Cela vaut pour le CatégoDéfo et le ClassifiMotif (des systèmes de classification) mais, bien entendu, ne présage pas d'une méthode universelle dans l'équipe IA. Des projets embryonnaires de rédaction de rapports d'analyse, qui s'appuieraient sur des outils d'IA générative, suivraient probablement des méthodes différentes.

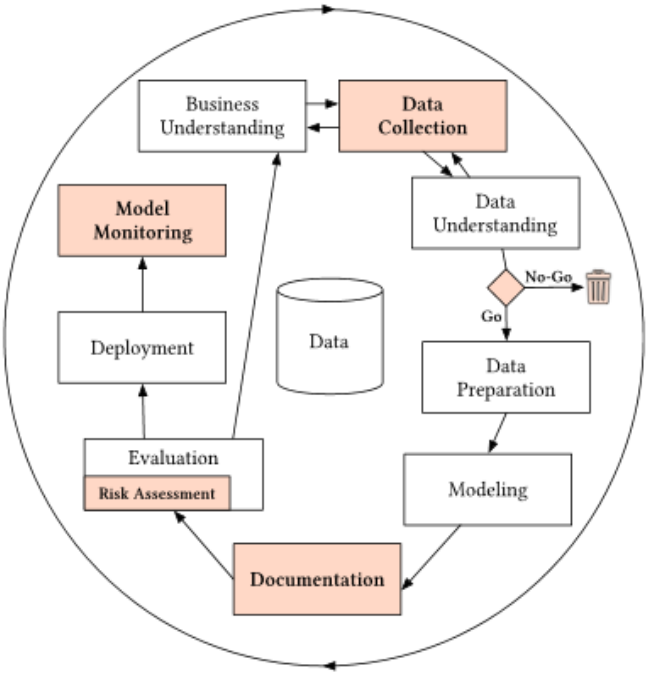


Fig. 6 Refined CRISP-DM model. Additions in red, with bold text

Figure 42 : Modèle de conception de système d'IA, adapté de CRISP-DM (Haakman et al., 2021).

Le modèle de la Figure 42 a été développé au travers d'une enquête auprès de développeurs de la « *fintech* », c'est-à-dire du développement logiciel IA pour la finance (Haakman et al. 2021). Le rapport avec l'industrie du semiconducteur n'est pas tout de suite évident, mais il nous paraît licite de présenter un tel modèle pour deux raisons. La première est simplement méthodologique, le but étant de l'observer avec un regard critique.

La seconde raison est plus épistémologique. Les procédés de traitement de données ont fait émerger la possibilité d'une « science agnostique » (Napoletani, Panza, et Struppa 2011) ayant recours à des « données agnostiques » (Kitchin 2014a). Le terme d'agnosticisme fait ici référence à l'absence de connaissances particulières sur les données, leur origine, leur collecte et leur formatage. Une donnée est une donnée, et peut être analysée en tant que telle, quelle que soit son signifiant (une donnée physiologique, administrative, financière) ou son contexte de collecte. Dans l'article sus-cité, D. Napoletani et ses collègues décrivent un changement de rôle des mathématiques dans les sciences computationnelles par rapport aux autres sciences de la nature et techniques. Ils expliquent que les mathématiques permettent traditionnellement, en biologie ou en physique, de construire des modèles qui favorisent la compréhension d'un phénomène d'intérêt. De nos jours, leur rôle au sein du paradigme computationnel – qui pénètre en réalité ces autres sciences – est un peu différent. Les mathématiques y sont utilisées pour construire des structures d'analyse complexes qui favorisent les capacités de prédiction, dont l'amélioration devient l'objectif principal. L'intelligibilité du modèle ainsi créé, tout comme celle du phénomène, ne sont plus prioritaires. Ce désintérêt pour la compréhension des phénomènes étudiés, alimenté dans l'industrie par des velléités d'optimisation de la circulation des flux, est justement l'un des facteurs du succès des mégadonnées et des méthodes qui permettent de les analyser. Leur

potentiel de généralisation à tout un ensemble d'activités fait leur force, sur le plan pratique mais aussi économique.

Dans ce paradigme où l'optimisation est l'objectif premier, l'important est de disposer de données. C'est pourquoi des entreprises comme celle investiguée par A. Henriksen et L. Blond (2023) peuvent concevoir des dispositifs d'aide à la prise de décisions pour des secteurs aussi différents que ceux de la comptabilité et de la santé, sans même avoir à consulter les professionnels qui utiliseront ces logiciels[254]. C'est aussi pourquoi nous nous permettons de prendre pour base un modèle qui se veut généralisable dans une certaine mesure.

Une conception pas à pas ?

La décomposition en étapes opérée par M. Haakman et ses collègues (2021) permet de rendre compte d'un certain nombre de phases dans la conception de systèmes d'IA. Elles sont relatives à la fixation d'objectifs du déploiement du système (*Business Understanding*), à un travail conséquent autour des données (*Data Collection*, *Data Understanding*, *Data Preparation*), à la modélisation au travers du recours à des techniques d'IA à proprement parler (*Modeling*), à une exigence de documentation (*Documentation*) à l'évaluation du système (*Risk Assessment*, *Evaluation*), son déploiement (*Deployment*) et son suivi (*Monitoring*). Nous pouvons confirmer avoir observé autour du ClassifiMotif toutes ces pratiques, et nous en avons déjà décrites certaines – les autres suivront.

Ce type de modèle de conception révèle plusieurs écueils. L'un d'entre eux est sa linéarité et sa séquentialité[255]. Nos observations montrent des allers et retours incessants entre les différentes phases du développement. Les objectifs du système peuvent être redéfinis à tout moment, la documentation n'est pas systématique, le déploiement peut se faire de façon graduelle. En réalité il est compréhensible que ces nuances n'apparaissent pas sur un tel modèle qui se veut succinct et synthétique, et qui reflète le résultat non pas d'observations *in situ*, mais plutôt de récits de développeurs eux-mêmes (Haakman et al. 2021). Ceux-ci ont une certaine vision de leur métier et des modèles standard de conception, qu'ils peuvent être tentés de rapporter aux enquêteurs (lesquels en ont bien conscience).

La distinction en différentes phases dans la conception des systèmes d'IA est reprise dans la littérature en STS (Bechmann et Bowker 2019). Ces auteurs y proposent notamment une revue de littérature des différentes décompositions du travail d'application de l'IA. Le contenu exact de ces étapes peut diverger, selon les auteurs, mais l'on retrouve dans tous les cas une segmentation linéaire. A. Bechmann et G. Bowker eux-mêmes parlent de « couches de production de savoirs » (« *layers of knowledge production* ») successives : définition de la tâche, collecte et arrangement des données, sélection du modèle,

[254] Bien entendu, d'autres technologies sont généralisables, comme le stylo ou l'ordinateur que l'on retrouve dans la majorité des entreprises. La différence avec l'IA réside dans le rôle analytique qui lui est attribué dans la prise de décision, et potentiellement dans l'action, là où des problématiques spécifiques à des métiers pourtant très différents sont traitées.

[255] T. Reverdy (2021) a montré que, pour des projets industriels de plus grande ampleur, cette séquentialité était aussi mise en défaut de plusieurs façons : en ne séparant pas clairement des phases d'exploration et d'exploitation, en conservant plusieurs options techniques parallèles jusqu'au choix définitif.

préparation des données, entraînement du modèle / déploiement[256]. Les auteurs expliquent que les étapes décrites ne sont pas nécessairement ordonnées précisément selon ce canevas, et peuvent être réitérées si elles donnent insatisfaction[257]. Ce découpage par couches est notamment emprunté par C. Heimstädt (2023) dans son étude sur la conception d'un système de reconnaissance de plante.

Un travail épistémique par la pratique

Une telle formalisation acte une construction linéaire, progressive et observable du développement du système d'IA. Or, nos observations pointent plutôt vers un modelage permanent du système d'IA, notamment au travers du travail effectué pour constituer sa base de données, voir (Figure 43). La conception, plutôt que d'être faite de phases, est en fait constituée par des pratiques et des activités qui se suivent et se répondent, sans ordre déterminé, de façon non-linéaire. Le travail épistémique de la base de données est un « travail conceptuel » (Girard-Chanudet 2025) qui s'inscrit dans la durée. Il est bien sûr possible de reporter divers moments-clés, des passages obligés, mais ceux-ci sont plutôt induits par des contraintes matérielles ou organisationnelles qui demandent à formaliser des tâches spécifiques (envoi au service Informatique des données à ingérer, productions d'indicateurs de performance chiffrés) que par un découpage naturellement rigide du processus de conception. Le même jour, un membre de l'équipe IA pourra réaliser plusieurs activités qui rentrent dans différentes cases à la fois.

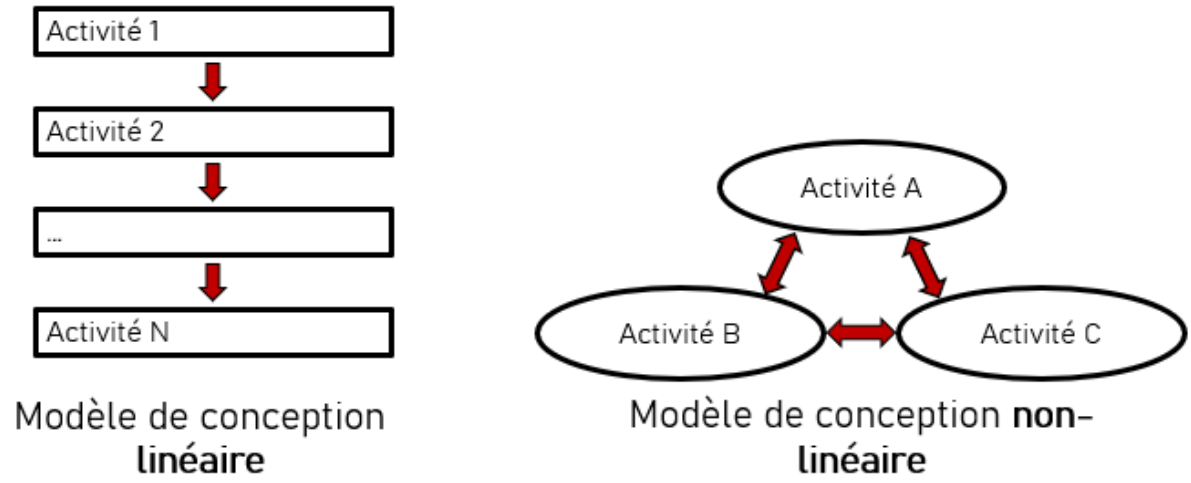


Figure 43 : Différents modèles de la conception de base de données présents dans la littérature.

Cette approche de la conception (par l'analyse d'une pluralité de pratiques) s'affilie au processus d'énaction (*enactment*) cher à W. Orlikowski (2000). Pour cette auteure, les technologies sont énactées dans la pratique, c'est-à-dire qu'il n'y a que par la pratique que l'on peut analyser les caractéristiques sociales, organisationnelles, culturelles d'une technologie, lesquelles n'existeraient ainsi pas par elles-mêmes – ce dont l'approche par l'appropriation fait l'hypothèse. Comme nous l'avons suggéré en début de chapitre, la conception et l'usage ne justifient pas une analyse strictement séparée comme deux

[256] Il n'est pas question de catégorisation ou d'annotation ici car A. Bechmann et G. Bowker s'intéressent à la production de systèmes d'apprentissage machine non-supervisé.

[257] La formulation dans l'article reste ambiguë : est-ce que le processus entier est repris en cas d'insatisfaction à l'issue d'une des étapes, ou est-ce juste cette étape particulière qui est recommencée ? Ça n'est pas explicite.

phases distinctes : elles sont toutes deux des moments de pratique de la technologie, de sa mise en œuvre, où elle est éprouvée. Etudier la conception de la technologie, en ce sens, n'est possible qu'au travers de l'analyse *in situ* des pratiques de conception.

On retrouve de façon implicite cette perspective dans la thèse de C. Girard-Chanudet (2023b), où celle-ci mobilise la notion « d'arc de travail », héritée d'A. Strauss (1985). L'arc de travail renvoie à la somme des activités qui composent l'ensemble du travail fourni au sein d'un projet particulier. Ces tâches peuvent être attribuées et réattribuées à différents acteurs, selon plusieurs échelles, à des moments spécifiques. Comme l'explique C. Girard-Chanudet (2023b:300), la notion d'arc de travail « permet ainsi d'appréhender le travail de conception d'une IA en suivant les activités menées par les membres de l'équipe le long d'une trajectoire centrale, sans présupposer *a priori* d'une organisation du travail prédéfinie et linéaire. » Le schéma proposé par la sociologue, voir (Figure 44), recentre en partie le travail de l'IA sur les objets produits et transformés par l'action de conception (cadre catégoriel, données annotées, algorithmes) en identifiant les activités qui lui sont associées (problématisation, labellisation, annotation).

C. Girard-Chanudet rappelle qu'à tout moment, des situations de « blocage » peuvent amener à reconsidérer le résultat d'une activité antérieure. Plutôt qu'un retour en arrière, nous considérons qu'il s'agirait plutôt d'une nouvelle étape dans le processus d'essai et d'erreur qui accompagne la conception du système d'IA.

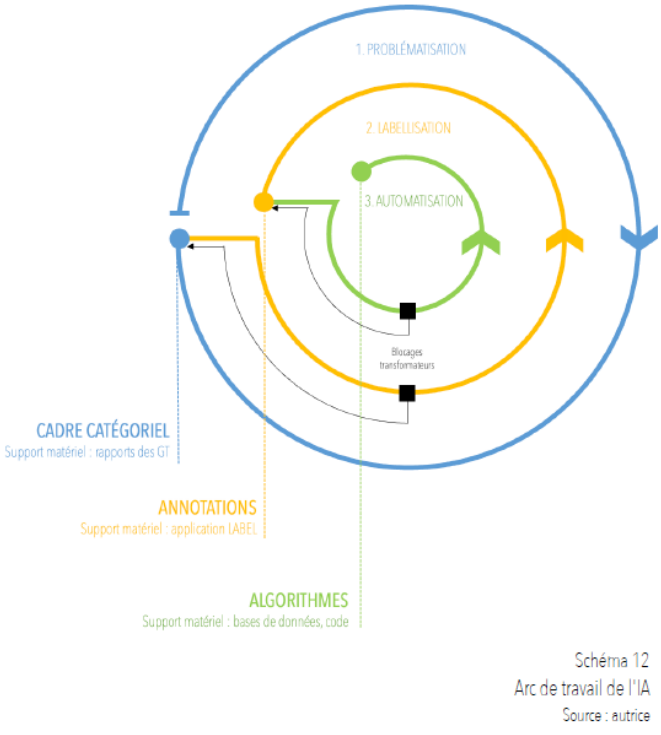


Figure 44 : Arc de travail de l'IA (Girard-Chanudet, 2023b).

Ce détour par l'appréciation de la schématisation de la conception des systèmes d'IA n'est à notre avis pas superflu. Il souligne les incertitudes inhérentes à ce type de projet, et donne des éléments pour expliquer leur longue durée (qui se compte en années pour le ClassifiMotif). Une telle approche explique aussi le décalage que nous avons noté entre les ingénieurs de l'équipe IA, pour qui la *release* n'est qu'une

étape du projet, et le service Informatique (**III.**1.c). Nous nous proposons dans la suite de décrire les activités épistémiques qui composent la conception du ClassifiMotif, et des systèmes d'apprentissage machine supervisé en général.

2.b. Activités épistémiques dans la conception de la base de données : catégorisation, annotation, peuplement

Pour décrire le travail de la base de données, nous allons en passer par l'explicitation de pratiques de construction qui les entourent : catégorisation, annotation, peuplement. Nous intégrerons à notre analyse la répartition différenciée de ces activités au travers d'un comparatif avec la littérature.

La base de données comme « *ground truth* »

La construction des bases de données constitue des matrices de « pratiques de vérité » (Henriksen et Bechmann 2020). C'est au cours de ce processus que la base de données est pensée en tant que « vérité terrain[258] » (*ground truth*). Le terme technique est hérité – sous sa forme anglicisée – de la télédétection (Woodhouse 2021), et a été réapproprié par les sciences computationnelles (Jaton 2017). F. Jaton (2025) propose justement de regrouper les études qui portent sur l'analyse de la fabrication de ces bases de données sous la bannière des *ground truth studies*. Les pratiques de « *ground-truthing* » ont justement été mises en lumière par cet auteur dans son livre *The Constitution of Algorithms* (Jaton 2020). Engagé dans une observation participante au sein d'un laboratoire de recherche, F. Jaton révèle les réflexions qui entourent la conception d'algorithmes de traitement d'image. Il montre qu'un important travail de problématisation est mené autour de l'algorithme utilisé par l'équipe qu'il a intégré[259], et que ce travail participe à déterminer la nature de la base de données.

L'exemple donné par F. Jaton mérite d'être développé : son enquête investigue la production d'un algorithme chargé de repérer la saillance (*saliency*) dans des images, c'est-à-dire ce qui apparaît en premier à l'observateur, ce qui lui saute aux yeux. En pratique, F. Jaton constate que la saillance peut être comprise de plusieurs façons. Elle peut renvoyer aux éléments les plus saillants d'une image, qui peuvent être multiples (interprétation 1), ou bien à l'élément le plus frappant, qui se dégage seul de l'arrière-plan (interprétation 2). La définition dépend en réalité des images qui composent la base de donnée. Un système peut être performant dans le premier cas et pas le second, et inversement, tout dépend des méthodes utilisées et des bases de données qui les alimentent. C'est ce qui fait dire à un enquêté de F. Jaton (2017) que « nous obtenons les algorithmes de nos *ground truth* ».

Des modèles de répartition des tâches dans la conception de l'IA

De façon générale, la conception des bases de données peut aussi bien être hautement centralisée autour de quelques acteurs clés, que collaborative et éclatée sur une diversité de parties prenantes, parfois à l'autre bout du monde. La constitution des bases de données s'appuie encore grandement sur une division internationale du travail (Tubaro et al. 2025). Des choix organisationnels cadrent ainsi le développement des systèmes d'apprentissage machine supervisé.

[258] Ou « vérité de terrain », voir (Fiant, Franchet, et Schwob 2024). On trouve les deux dans la littérature technique.

[259] Le cas évoqué par F. Jaton est un peu particulier : l'algorithme utilisé n'est pas issu d'un apprentissage automatisé, il est codé à la main sur la base d'un modèle computationnel obtenu grâce à des données d'entraînement. En cela, il ne rentre pas dans les canons de l'apprentissage machine à strictement parler.

Afin de mieux appréhender les modalités de répartition des tâches, nous proposons un modèle bi-dimensionnel qui s'étend selon deux axes, voir (Figure 45). L'objectif de ce modèle est de rendre compte des dynamiques socio-économiques et interactionnelles qui entourent le travail épistémique des bases de données d'entraînement des systèmes d'IA.

- Localisation des tâches épistémiques (déléguées ←→ centralisées), qui rend compte de la diversité géographique et socio-économique des parties prenantes intégrées dans le projet. Lorsque la répartition du travail est centralisée, un petit groupe localisé d'individus s'attelle à la conception de la base de données. Dans le cas de la délégation, le travail est partiellement sous-traité à d'autres acteurs. On parle de délégation et non pas de décentralisation car, comme nous le verrons, certaines tâches restent réservées aux concepteurs des dispositifs qui y tiennent une position centrale.
- Concentration du cadrage épistémique (horizontalité ←→ verticalité), qui explicite les marges de manœuvre et de décision des parties prenantes intégrées dans le projet. Ce critère prend en compte les liens de subordination qui peuvent lier entre eux les parties prenantes. Le cas vertical renvoie à des situations où les concepteurs supervisent et décident de l'ensemble des caractéristiques épistémiques du dispositif d'IA. Dans une configuration horizontale, ces décisions sont l'occasion d'interactions qui prennent en compte les contributions conceptuelles des acteurs.

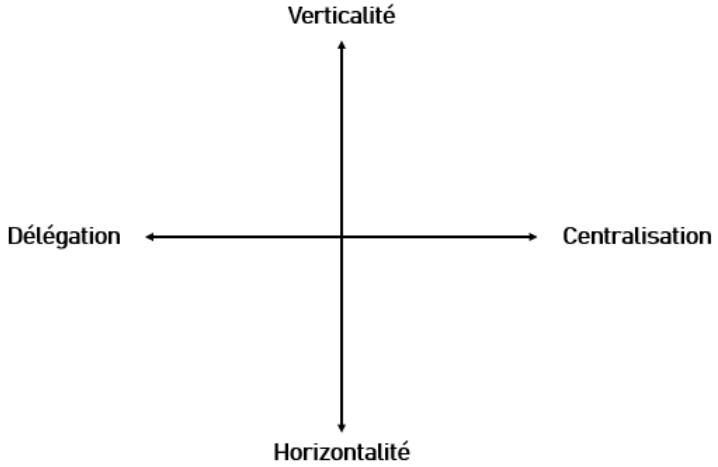


Figure 45 : Modèle de répartition du travail des bases de données.

Ces deux dimensions se présentent sous la forme d'un *continuum* qui s'évalue au cas par cas : la répartition des tâches peut être plus ou moins centralisée, plus ou moins verticale. Le modèle vise à rendre compte des formes majoritaires ou inexplorées de répartition du travail épistémique des bases de données.

Des activités de base

Afin d'exploiter et d'illustrer le modèle, l'analyse du travail de la base de données demande à entrer avec plus de précision dans le détail des activités qui lui sont caractéristiques. Nous en détaillons trois majeures ici : catégorisation, annotation et peuplement. Elles peuvent être caractérisées comme des activités au sens où l'on peut segmenter des plages de temps qui leur sont strictement imparties. En ce sens, nous ne dirons pas que les frontières entre ces activités sont poreuses, elles sont au contraire bien délimitées.

En dépit de la netteté de cette scission, des questions concernant les autres activités peuvent survenir au milieu d'une autre. Par exemple, des sessions d'annotation tumultueuses viennent régulièrement interroger le système de catégories structurant la base de données.

Pour caractériser ces différentes activités, nous nous appuierons sur une sélection variée et non-exhaustive de cas issus de la littérature en SHS qui traite de la constitution de base de données, voir (Tableau 7). Remarquons d'emblée qu'aucune étude que nous avons pu consulter ne paraît relever du cadran « Délégation horizontale », dans lequel les experts en mégadonnées ont finalement le moins de pouvoir d'agir dans la création du dispositif. On peut imaginer que des projets qui s'inscrivent dans le cadre de sciences participatives ou des sciences citoyennes puissent rentrer dans cette case[260].

Tableau 7 : Sélection de travaux traitant de la constitution de bases de données pour des systèmes d'IA

Travaux	Objectif du projet investigué	Modèle suivi
(Girard-Chanudet 2023b, 2023c)	Pseudonymisation des décisions de justice, à la Cour de cassation française	Centralisation horizontale
(Heimstädt 2023)	Reconnaissance de pathologies de cultures agricoles, par une startup indo-allemande	Délégation verticale
(Jaton 2017)	Identification des zones saillantes dans des images, dans un laboratoire de traitement d'images européen	Délégation verticale
(Le Ludec et al. 2023), cas 1	Identification d'aliments pour facturation automatisée, par une startup française	Délégation verticale
(Le Ludec et al. 2023), cas 2	Détection de vols à l'aide de caméras dans les supermarchés, par une startup française	Délégation verticale
(Lebovitz, Levina, et Lifshitz-Assa 2021)	Diagnostic par différents systèmes (identification de tumeurs cérébrales, de lésions dans des mammographies, d'anormalité dans le développement osseux infantile), dans un hôpital étasunien	Délégation verticale
La présente thèse	Détection de motifs de défauts dans l'industrie du semiconducteur	Centralisation verticale

Catégorisation

Pour la catégorisation comme pour l'annotation, le terme désigne aussi bien le processus que son résultat[261]. La catégorisation consiste à établir un ensemble de catégories qui partitionnent un espace d'objets particuliers, voir (Figure 46). G. Bowker et S. Star, qui ont dédié leur ouvrage *Sorting Things Out*

[260] Voir par exemple (Van Horn et al. 2018). Les chercheurs ont conçu un système de reconnaissance d'espèces animales (*via* l'analyse des photographies) et repose sur une base de données conçue par des naturalistes bénévoles dans le cadre d'un projet de sciences citoyennes. La catégorisation repose quant à elle sur le consensus scientifique. Les concepteurs du système d'IA ont ainsi une marge faible dans la catégorisation et l'annotation des données.

[261] La catégorisation est à la fois l'activité qui consiste à établir un système de catégories (le processus), et la répartition effective, temporaire ou définitive, en catégories (le résultat).

au sujet des classifications[262] et des pratiques qui les entourent en dégagent trois caractéristiques majeures (2000:10-11) :

- Cohérence : les classes respectent un principe d'organisation unique et commun.
- Exclusion mutuelle : un élément ne peut appartenir à plusieurs classes à la fois.
- Complétude : n'importe quel élément concerné par la classification peut être classé.

Après avoir énoncé ces grands principes, G. Bowker et S. Star le reconnaissent immédiatement : aucune classification ne les respecte à la lettre. Chaque classification, à sa manière, dévie de ce schéma idéal. Malgré tout, les classifications ont une portée infrastructurelle (Bowker et Star 2000:37-45), au sens où elles sont ubiquitaires (elles sont partout à la fois), où elles sont matérialisées dans le réel, où elles expriment un positionnement lié à contexte spatio-temporel particulier et enfin où elles incarnent et sont le résultats de rapports de force.

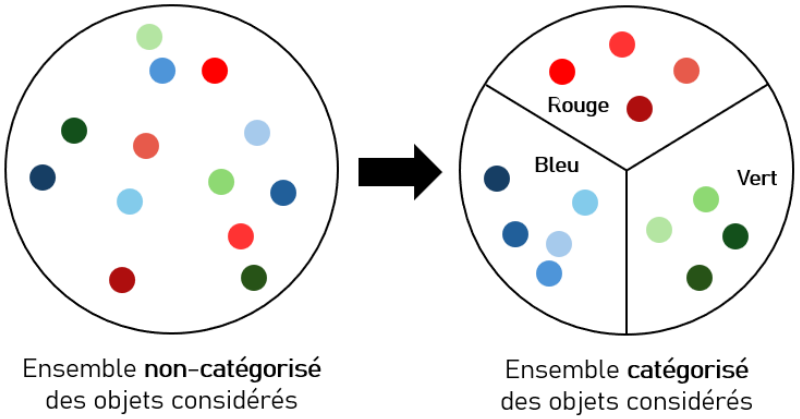


Figure 46 : Illustration schématique de la catégorisation.

En apprentissage machine supervisé, l'établissement de catégories est un préalable à la réalisation d'une tâche de classification par le système. La catégorisation cherche à couvrir les cas de figure qui peuvent être rencontrés par un système donné. Sur le plan qualitatif, elle établit des frontières qui offrent un cadrage rigide à la façon dont le problème est traité par l'algorithme. Comme l'écrit T. Gillespie (2014) : « Une fois instituée, une catégorie trace une démarcation qui sera traitée avec révérence par l'algorithme qui l'aborde[263]. » Sur le plan quantitatif, les pratiques de classification souffrent d'une tension entre exhaustivité et rareté. S'il existe trop de catégories, celles-ci risquent de devenir inopérantes, car elles amènent à continuiser un espace discret et complexifier leur intelligibilité (*qu'est-ce qui distingue telle catégorie de telle autre ?*). Au contraire, s'il n'y a pas assez de catégories, elles peuvent être trop floues et ne pas permettre pas d'aiguiller l'analyse ni de guider l'action. La recherche d'un juste milieu est par elle-même une entreprise périlleuse. Elle n'est pas gouvernée par des consignes ou des standards évidents, et porte une forme d'arbitrarité que doivent exercer les concepteurs de ces systèmes.

[262] Dans ce travail, nous considérons « catégorie » et « classe » (ainsi que les verbes et substantifs associés) comme des synonymes. Cette simplification ne fait pas nécessairement l'unanimité dans le domaine du traitement de données (Jacob 2004).

[263] « Once instituted, a category draws a demarcation that will be treated with reverence by an approaching algorithm » (notre traduction).

Dans la littérature, on observe différentes modalités de contribution dans le processus de catégorisation. Les classifications sont généralement établies par les acteurs qui ont véritablement la main sur le système d'IA, de façon verticale. Les entreprises qui vendent les systèmes aux hôpitaux fixent ainsi certaines catégories précises : « normal » et « anormal », « bénin » et « malin » (Lebovitz et al. 2021). De la même façon, ce sont les chercheurs en traitement d'image qui définissent ce qu'est la saillance (Jaton 2017). Dans d'autres cas, le processus intègre plus collectivement d'autres travailleurs. Au fur et à mesure des cas rencontrés sur le terrain, rapportés dans des réunions dédiées, les annotatrices rencontrées par C. Girard-Chanudet (2023b) contribuent à spécifier la complexité du problème de pseudonymisation. Elles font face à des cas ambigus qui amènent à repenser la catégorisation au cours de réunions dédiées. L'auteure donne l'exemple de la catégorie « établissement », qui « non prévue en tant que telle par les rapports des groupes de travail, […] émerge en effet progressivement de la confrontation des règles conceptuelles à l'expérience empirique de codage » (2023b:13). Même dans les cas où l'annotation est déléguée à des agences dans des pays étrangers, comme à Madagascar, les remontées d'informations peuvent contribuer à transformer la catégorisation (Le Ludec et al. 2023). Le lien de sous-traitance existant encourage cependant à caractériser cette répartition des tâches comme étant verticale[264].

Dans le service Qualité de SemiCorp, en l'occurrence, le ClassifiMotif repose sur une catégorisation des différents types de motifs. Celle-ci est construite de sorte à caractériser et distinguer ces motifs et résulte d'un ensemble de négociations collectives. Cependant, les ingénieurs de l'équipe IA sont ceux qui définissent les objectifs du dispositif, encadrent son déploiement, et ultimement, tranchent les décisions. En ce sens, malgré une participation ponctuelle d'autres acteurs de SemiCorp, la répartition des tâches reste largement verticale. Nous reviendrons largement, dans la suite de ce chapitre, sur la constitution de la catégorisation encadrant le ClassifiMotif.

Annotation

L'annotation est l'activité d'association d'un élément à une catégorie[265], voir (Figure 47). C'est une instance de classification particulière, on parle indistinctement de labellisation ou d'étiquetage.

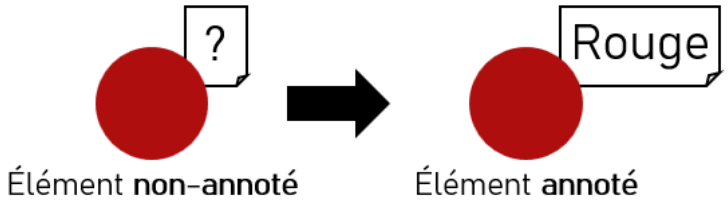


Figure 47 : Illustration schématique de l'annotation.

Les bases de données annotées constituent une ressource précieuse, qui se produit, se vend et s'achète. Le site EdenCore, spécialisé dans l'IA pour l'agriculture, fournit par exemple des bases de données d'images annotées de plantes malades dans le but d'entraîner des systèmes de reconnaissance de maladie, voir (Figure 48). En IA, différentes méthodes ont historiquement été utilisées pour annoter des

[264] En vertu du continuum que nous avons décrit, cette verticalité reste moins verticale que celle qui peut exister lorsque les concepteurs se tournent vers des micro-travailleurs de plateformes indépendants.

[265] Entendue de cette façon, l'annotation n'a rien à voir avec le sens courant du terme (comme dans « annoter un manuscrit » par exemple).

données (Ao et Fan 2022) : de façon manuelle, une annotation à la fois, ou de façon semi-automatique, l'annotation étant partiellement déléguée à des algorithmes qui prémâchent le travail.



Figure 48 : Capture d'écran du site https://www.edencore.ai/shop/, où il est par exemple possible d'acheter un lot d'images annotées d'abricotiers atteints de la sharka.

L'annotation peut aussi bien servir à alimenter une base de données d'entraînement (qui sert de référence au système d'IA) qu'une base de données de test (qui sert à évaluer les résultats fournis par le système). La base de données annotée complète peut être arbitrairement fractionnée en deux sous-bases qui portent l'une ou l'autre de ces fonctions.

Trois caractéristiques permettent de distinguer l'intégration de l'activité d'annotation dans la constitution des bases de données : le lieu de l'expertise mobilisée (interne ou externe à l'équipe à l'origine du projet), le statut des annotateurs (initialement profane, ou expert), et le modèle économique de la coopération (salariat, rémunération non-salariée, ou bénévole).

Le premier critère de différenciation est le recours soit à une expertise externe pour contribuer au projet, soit à des compétences en interne. Le premier cas est fréquent : l'annotation est déléguée à des services externalisés ou à des experts indépendants (Jaton 2017; Le Ludec et al. 2023). Dans d'autres situations, plus centralisées les équipes d'annotation sont employées en interne, à l'instar des annotatrices recrutées par la Cour de Cassation (Girard-Chanudet 2023b, 2023c) ou des « chasseurs d'images » indiens (Heimstädt 2023).

Le second point de distinction concerne le statut des individus chargés d'alimenter les bases de données. Ils peuvent être des experts autant que des profanes, selon les types de tâches à réaliser. Ce statut initial est bien entendu susceptible d'évoluer, au sens où l'expertise s'acquiert précisément par la pratique. C'est encore une fois ce que montrent les travaux de C. Girard-Chanudet (2023b, 2023c). Dans la plupart des cas, un guide d'annotation est ainsi fourni pour aiguiller les annotateurs (Le Ludec et al. 2023). Des experts sont généralement mobilisés lorsque la tâche est considérée d'une complexité supérieure, notamment dans le cas d'applications médicales (Lebovitz et al. 2021). Cette dernière étude est un peu particulière, au sens où la reconstruction de bases de données est la conséquence d'un manque

d'informations des professionnels de santé qui souhaitent, par ce biais, reprendre le contrôle de l'évaluation des systèmes d'IA développés de façon opaque par des startups.

Une troisième divergence renvoie enfin au modèle organisationnel et économique de la coopération entre les parties prenantes de la conception de la base de données : certains participants peuvent être salariés (Girard-Chanudet 2023b, 2023c), quand d'autres, les micro-travailleurs, sont rémunérés en dehors du cadre du salariat (Le Ludec et al. 2023) ou même bénévoles (en particulier pour des applications médicales ou liées à la recherche scientifique).

C'est d'abord le volume de travail, conjugué à une estimation des coûts de ce travail, qui guide le recours à des prestataires externes. L'annotation est une activité qui peut se révéler fastidieuse, car elle est répétitive et peut se dérouler sur le long-terme, surtout lorsqu'il s'agit de constituer une base de données qui peut contenir des centaines voire des milliers d'échantillons. Mais à SemiCorp, où les données sont hautement confidentielles, de tels procédés ne peuvent être mis en place, d'où l'adoption d'une concentration centralisée des tâches. Les ingénieurs de l'équipe IA eux-mêmes sont en charge des annotations. En pratique, nous avons observé qu'une base de données de test *ad hoc* peut être constituée à partir d'images de plaques récentes passées par la production, de sorte à obtenir un échantillon réaliste de ce à quoi le ClassifiMotif pourrait être confronté.

Peuplement

Le peuplement est l'activité qui consiste à choisir les données annotées à faire figurer dans la base de données, voir (Figure 49). Toute donnée en effet, n'est pas éligible à être incluse dans une base de données, qu'elle serve à l'entraînement ou à la validation d'un système d'IA. Une sélection est réalisée de façon plus ou moins souple. Peupler la base de données revient à entériner le statut de référence des échantillons choisis.

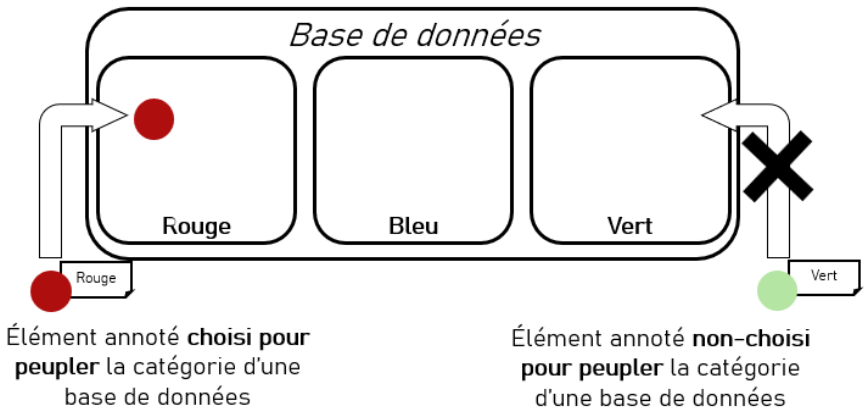


Figure 49 : Illustration schématique simplifiée du peuplement.

A notre connaissance, l'activité de peuplement est peu investiguée par la littérature, ou alors de façon implicite. T. Gillespie (2014) évoque par exemple les mécanismes d'exclusion des données, notamment vis-à-vis de contenus offensants dans le cas d'algorithmes de recommandation. Le peuplement peut être inclus dans l'activité de collecte des données, lors de laquelle une sélection des données d'intérêt est opérée. Plutôt que de collecte, C. Heimstädt (2023) parle de « génération » de données à partir du phénomène d'études – des plantes dans son cas. Les données n'existent pas par elles-mêmes, elles

sont construites à partir d'une récupération d'information (images, noms, date) qui inclut des intermédiaires sociotechniques. Cette sélection s'opère au détriment d'éléments non sélectionnés, ainsi que d'informations contextuelles qui n'apparaissent plus dans le formatage final de la donnée. C. Heimstädt note qu'un important travail est réalisé pour « trier les ordures » (*sorting garbage*), c'est-à-dire pour identifier les images de mauvaise qualité afin de ne pas les inclure dans la base de données d'entraînement du système d'identification.

Le peuplement reste, à ce jour, la chasse gardée des concepteurs de systèmes d'IA. L'activité de peuplement est la seule qui paraisse toujours être réalisée par les ingénieurs en charge des systèmes. Elle témoigne de l'application d'une certaine normativité, au sens où ce sont eux qui ont le pouvoir de déterminer ce qui constitue une bonne base de données, ou qui soit du moins satisfaisante compte tenu des données mises à disposition. C'est pourquoi sur l'axe qui concerne la localisation des tâches épistémiques, notre modèle oppose « délégation » – plutôt que « décentralisation » – à « centralisation ». Les ingénieurs délèguent une partie des tâches, mais en conservent la maîtrise et la validation. Ils sont seuls en mesure de définir la légitimité d'une annotation à accéder au rang de référence, en l'intégrant à la *ground truth*.

A SemiCorp aussi, la base de données du ClassifiMotif se voit régulièrement additionnée ou soustraite de ces données. Un peuplement est réalisé par Claude puis Jérôme dès qu'il est question d'adapter le système et d'en proposer une nouvelle version. Les premiers modèles mis à part, le peuplement est rarement effectué à partir d'une table rase. La base est tantôt dépeuplée, tantôt repeuplée, de sorte à enlever des données problématiques, et en ajouter de nouvelles qui conviennent mieux.

2.c. Généalogie partielle d'une base de données : concevoir l'IA, concevoir le travail

Les bases de données des systèmes d'IA sont des objets mouvants, dynamiquement (re)constitués au fur et à mesure des modifications opérées par les ingénieurs qui les conçoivent. Nous nous proposons d'entrer dans le détail technique du *dataset*, le nom que donnent les membres de l'équipe IA à la base de données associée au ClassifiMotif. L'exercice de sa généalogie apparaît comme un moyen pertinent pour révéler ses soubassements pratiques et organisationnels. Loin de n'être qu'un banal répertoire, cette base de données embarque certaines visions de l'organisation et du travail.

Biographie des algorithmes

Les appels à la généalogie des bases de données d'entraînement des systèmes d'IA dérivent d'abord d'une critique relative aux discriminations que peuvent prolonger ou engendrer des dispositifs entraînés sur la base de données historiques (Denton et al. 2021). R. Denton et ses collègues rendent compte du cas d'ImageNet, une base de données massive, composées d'images annotées de toute sorte. C'est l'une des plus utilisées au monde, déjà décriée pour son contenu sexiste et raciste[266] (Crawford et Paglen 2019). En revenant sur le cas ImageNet, l'objectif est de ramener la question sociale dans le débat sur les bases de données (« *bring people back in* ») pour « nous forcer à nous concentrer sur les pratiques de travail contingentes, historiques et ancrées dans des valeurs, des chercheurs en apprentissage machine[267] » (Denton et al. 2020:1-2). La généalogie des bases de données est un exercice visant à expliciter leur cohérence interne et les moyens mis en œuvre pour les faire advenir, afin de mieux comprendre leur incidence sur leur environnement sociotechnique. Pour ce qui concerne ImageNet, les auteurs livrent une histoire de son émergence, dans un contexte initial de recherche académique (Denton et al. 2021). Des outils d'indexation de contenu en ligne (du type Google Images) y ont été mobilisés pour récupérer les images, tandis que des plateformes de micro-travail sont utilisées pour les faire annoter par des travailleurs depuis chez eux. Cette généalogie rend également compte de certains présupposés de ses concepteurs (et notamment Fei-Fei Li, la chercheuse à l'origine du projet) concernant la capacité à représenter n'importe quel concept par des images.

Retracer l'histoire de ces systèmes a bien d'autres vertus. Dans le champ de la sociologie des organisations, plusieurs auteurs encouragent à s'atteler à des biographies de systèmes sociotechniques, des progiciels de gestion intégrée (Williams et Pollock 2012) jusqu'aux algorithmes (Glaser, Pollock, et D'Adderio 2021b). Les biographies sont le moyen de mettre en lumière les intentionnalités qui peuvent être encodées dans le système (Glaser et al. 2021b), et activées ou non dans l'usage. Pour V. Glaser et ses collègues (2021b), trois moments-clés successifs sont ainsi à analyser : 1) les potentiels conflits entre le système algorithmique et les savoirs existants, ou d'autres systèmes concurrents ; 2) les pratiques de conception des systèmes algorithmiques, et en particulier la formulation des objectifs qui leur sont associés, leur évaluation ; et 3) les efforts et contraintes associées à la généralisation du système algorithmique, à son application dans d'autres contextes. Dans cette lignée, E. Kang (2023) propose de

[266] On y trouve par exemple une catégorie « casse-couilles » (littéralement : *ball-breakers)* arbitrairement constituée de photographies de femmes.

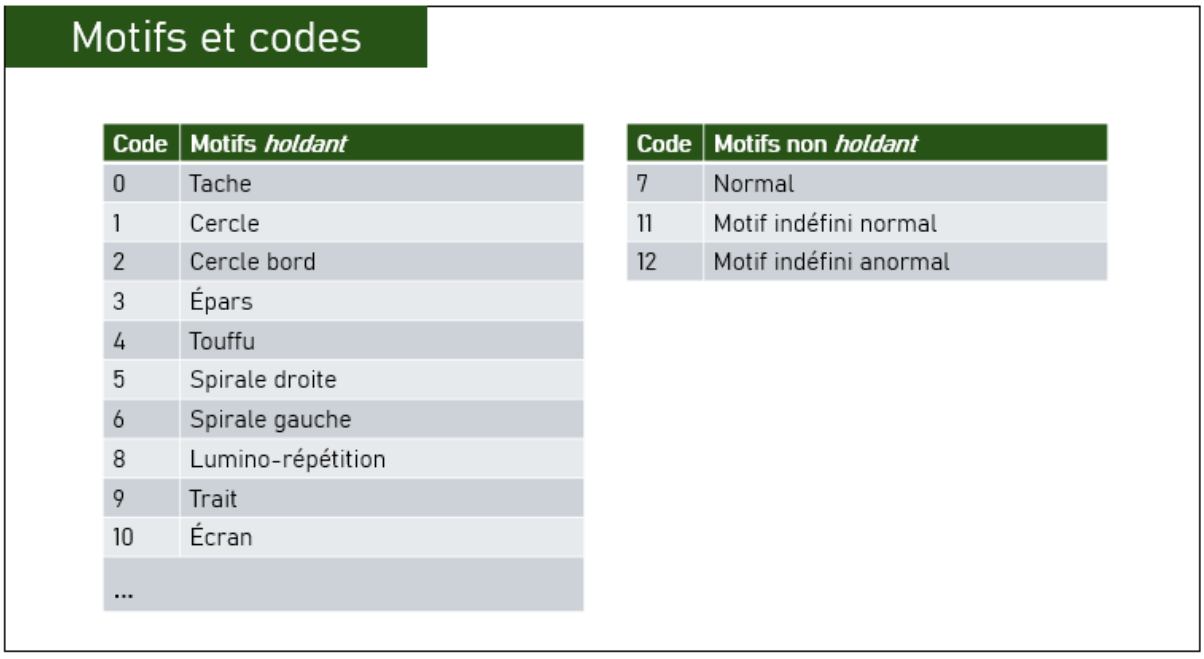
[267] « Bringing the people back in forces us to focus on the contingent, historical, and value-laden work practices of actual machine learning researchers » (notre traduction).

s'adonner à un traçage des vérités terrain (*ground truth tracing*) qui vise à rendre compte des processus de conception des bases de données sur le plan qualitatif.

Une histoire orale de la donnée

Avant même de repartir à l'origine du ClassifiMotif, quelle est la forme finale de son *dataset* ? Nous ne la restituerons pas avec exactitude puisqu'en sus d'une exigence de confidentialité, elle évolue constamment, ce qui trouble la réalisation de l'exercice. Reprenons au début 2023. A ce stade, elle est composée d'une vingtaine de catégories parmi lesquelles[268] : « tache », « cercle », « cercle bord », « amas », « trait », « écran », « épars, « touffu », « spirale gauche », « spirale droite », « lumino-répétition », « normal ».

Pour tenir le compte, Claude puis Jérôme assurent la maintenance d'un document spécifique qu'ils appellent « l'herbier ». L'herbier est un document PowerPoint, qu'ils enregistrent sur une plateforme interne en ligne. Sa page de garde liste l'ensemble des motifs avec, pour chacun, un code numérique. Ces herbiers rappellent vivement les « répertoires », un des types « d'objets-frontière » décrits par S. Star et J. Griesemer (1989). En tant qu'outils collaboratifs, ils contribuent à la standardisation des pratiques de qualification des motifs. Nous proposons une reproduction altérée de la page de garde de l'herbier (Figure 50).



Motifs et codes

Code	Motifs *holdant*
0	Tache
1	Cercle
2	Cercle bord
3	Épars
4	Touffu
5	Spirale droite
6	Spirale gauche
8	Lumino-répétition
9	Trait
10	Écran
...	

Code	Motifs non *holdant*
7	Normal
11	Motif indéfini normal
12	Motif indéfini anormal

Figure 50 : Page de garde de l'herbier présentant les motifs et leurs codes (reproduction, les motifs ne sont pas exhaustifs et les noms ont été changés).

Les pages suivantes de l'herbier passent en revue les différentes catégories, présentées seules ou par deux (par exemple dans le cas des « spirales »). Chaque classe dispose d'un nom et d'exemples d'images tirées de la production. Les images utilisées sont de qualité variée, avec des formats visiblement différents, qui indiquent qu'elles ont été récoltées sur des versions de logiciels différentes. Des éléments textuels servant à leur définition sont aussi consignés. Composés d'une phrase, deux au maximum, ils

[268] Les noms des motifs ont été modifiés.

servent de définition autant que de description. Les catégories « cercle » est par exemple accompagnés d'une courte phrase (« Les défauts forment un périmètre de cercle complet ou partiel ») ainsi que de quelques images, voir (Figure 51).

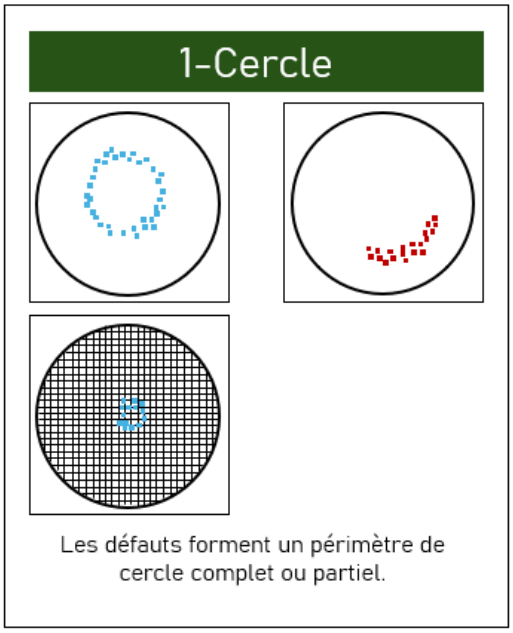


Figure 51 : Page « Cercle » de l'herbier (reproduction altérée).

L'histoire du *dataset* est avant tout orale, l'historique des catégories n'est pas gardé en mémoire pendant les premiers mois du projet. L'enregistrement d'un nouvel herbier écrase le précédent, de sorte que l'ancien n'est pas conservé[269]. Claude et Jérôme mettent à jour l'herbier à chaque modification de catégorie. Ils y procèdent lorsqu'un nouveau type de motif est repéré (ce qui s'avère de plus en plus rare à mesure de leur progression), lorsqu'un motif est scindé en deux sous-motifs ou, inversement, lorsque des motifs sont fusionnés. Ces deux dernières pratiques résultent généralement de tentatives d'améliorer de performance du système. Bien que ces choix puissent être ancrés dans des processus collectifs, Claude et Jérôme sont, successivement, les principaux décisionnaires relativement à la modification de la base de données et de son herbier.

Dans certains cas, des motifs qui n'apparaissent plus en production sont malgré tout conservés dans la base de données. Claude explique ainsi, lors d'une réunion de travail et à propos du motif « écran » : « [Dans l'atelier concerné,] ils nous on dit qu'ils ont réglé le problème mais c'est bon, on l'a en stock[270]. » En ce sens, la base de données conserve la trace d'un savoir qui, inusité, pourrait devenir archaïque. Elle constitue une archive dans laquelle des savoirs peuvent être transcrits – ici sous la forme d'un nom (« écran »), d'exemples, d'éléments de définition. Cette sauvegarde n'est pour autant pas une garantie de la conservation de l'expertise liée à ce savoir. Si, dans dix ans, de nouveaux « écrans » apparaissent, l'équipe IA saura-t-elle toujours mettre à contribution le ClassifiMotif dans ce cas de figure ? La catégorie pourrait même avoir été supprimée, car considérée obsolète. Ce sont là des hypothèses

[269] En pratique, il est possible que les herbiers en question aient été envoyés par mail, qu'ils apparaissent dans des corbeilles numériques non vidées : ils pourraient être récupérés. Ils ne sont en tous cas pas conservés de façon intentionnelle.

[270] Propos recueillis lors d'une réunion de travail en juin 2022.

prospectives qui interrogent la trajectoire d'évolution du *dataset*, et de son intégration dans le travail d'analyse qualité.

C'est seulement à l'occasion d'un grand nettoyage, débuté à l'automne 2022, qu'un document de traçabilité est créé par Jérôme, responsable du ClassifiMotif, et par Delphine, qui dirige l'équipe Suivi Temps Réel laquelle, depuis les bureaux, entretient la plus grande proximité avec la salle blanche. Il s'agit d'un tableur Excel qui recense l'ensemble des catégories. Chacune d'entre elle a été repensée et fait l'objet d'une définition précise, inscrite dans l'herbier. Cette vaste opération de clarification du *dataset* accompagne le déploiement progressif du ClassifiMotif en salle blanche. Son implémentation nécessite en effet des mises à jour logicielles qui doivent s'opérer individuellement sur chacune des machines de l'atelier du service Qualité.

Catégories causales, catégories descriptives

L'examen des catégories révèle deux types de dénominations : les classes descriptives, et les classes causales. Alors qu'elle paraît anecdotique, nous allons voir qu'au contraire cette distinction porte en elle des représentations différentes de l'organisation du travail.

Les classes descriptives portent des noms correspondant directement à ce qui est vu. Certaines sont désignées par des formes géométriques (« cercle », « trait », « spirale »). D'autres appellations évoquent des interprétations spécifiques du schéma de défaut. Par exemple, le motif « écran » correspond à un rectangle préservé au milieu d'une plaque plein de défauts. Les classes descriptives peuvent aussi renvoyer à des motifs imprécis, inclassables, remarqués avant tout par la densité de défauts qu'ils présentent (« épars », « touffu »). Ces derniers motifs sont un peu spécifiques au sens où ils agrègent, de façon négative, des motifs qui ne s'apparentent pas à des motifs nommés par ailleurs. Il existe enfin un motif « normal », un non-motif en quelque sorte, qui signifie qu'il n'y a pas de motif particulier : le ClassifiMotif doit pouvoir indiquer qu'une plaque ne présente pas de problème notable.

Les classes causales d'autre part, beaucoup moins nombreuses (il n'y en a que deux lors de la photographie que nous en faisons présentement) font quant à elle référence à la cause directe du motif produit sur la plaque. C'est le cas du motif « lumino-répétition », qui correspond à un phénomène physique bien particulier, et qui reste visuellement identifiable.

Le *dataset* de l'équipe IA est majoritairement descriptif, bien qu'il continue d'associer des règles de classification différenciées en intégrant toujours des classes causales résiduelles. Ce phénomène est classique du « compromis dynamique » des systèmes de classifications, qui rendent visible, par la persistance de ces hétérogénéités, leur histoire technique, des divergences de représentations ou d'objectifs, des effacements systématiques (Bowker et Star 2000:55).

Cette orientation de conception descriptive ne va pourtant pas de soi. Comme l'ont montré G. Bowker et S. Star (2000:131), il n'y a pas de système de classification qui soit naturel, ou qui puisse prétendre à l'universalité. On le constate à SemiCorp où chaque site a sa propre approche. Quand Claude commence à enquêter en interne sur la meilleure façon de concevoir le ClassifiMotif, il se met en relation avec d'autres services Qualité de SemiCorp, où des démarches similaires sont entreprises. A FrancoSite, l'équipe en charge d'un système similaire construit une base de données qui contient plus de quatre-

vingts motifs. Leur ambition est de relier chacun des motifs détectés à une cause explicite, associée à un atelier particulier, voire à une machine de production précise. Le système de classification déployé par FrancoSite se veut ainsi le plus causal possible. Cette option a été explorée par Claude mais n'a pas donné de résultats satisfaisants.

Quand la catégorisation explicite l'organisation idéale du travail

Loin d'être anodine, la distinction entre ces deux types de catégorisation – descriptive et causale – renvoie à des perspectives différenciées des modes d'organisation du travail au sein du service Qualité, voir (Figure 52). Pour le comprendre, il faut se rappeler du rôle du ClassifiMotif : son but est de générer des alertes auprès des techniciens Qualité, pour qu'ils se penchent sur des plaques défectueuses spécifiques et qu'ils produisent des rapports d'analyse de problèmes détectés dans la production.

Dans ce contexte, des motifs descriptifs permettent d'apporter une information supplémentaire aux techniciens. A partir de l'analyse des défauts présents sur la plaque, de la connaissance de son historique de fabrication, ils peuvent formuler des hypothèses sur les problèmes qui ont été rencontrés. En d'autres termes, l'instauration d'une catégorisation descriptive vise à outiller le technicien dans son travail d'analyse.

A contrario, une catégorisation causale présupposerait une capacité du système de classification à établir des liens de cause à effet directs entre la présence d'un motif et son origine matérielle. Le technicien serait alors relégué à un rôle de correction, de validation. En d'autres termes, la catégorisation causale néglige le travail d'analyse réalisé par les techniciens en l'outrepassant. Elle détermine une modalité d'utilisation plus rigide du système de classification.

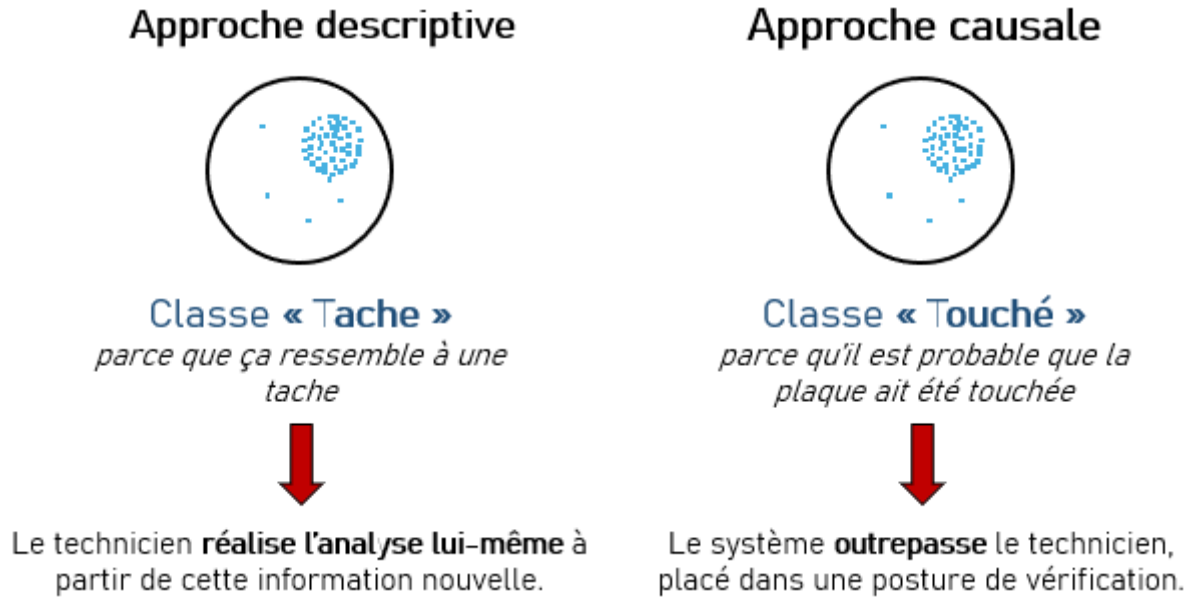


Figure 52 : Comparaison entre les approches descriptive et causale dans le processus de catégorisation, et leurs significations pour la représentation de l'organisation du travail.

L'analyse peut être enrichie d'une comparaison entre le ClassifiMotif et le CatégoDéfo, puisque les enjeux de l'automatisation sont plus subtils qu'il n'y paraît. Le CatégoDéfo, dont nous avons pu observer l'utilisation en salle blanche auprès des techniciens, permet de catégoriser automatiquement et

individuellement les défauts présents sur les plaques. Si, comme nous l'avons raconté (**II.**2.b), le lancement du CatégoDéfo n'a d'abord pas été un succès, force est de constater que les techniciens en salle blanche le plébiscitent désormais. Le CatégoDéfo est également un système de classification, avec sa propre catégorisation, et celle-ci, quant à elle, est majoritairement causale. Les classes de défauts, telles que « particule en surface » ou « particule enterrée », font directement référence à l'origine du défaut. Les techniciens valident les résultats du CatégoDéfo, ou les reclassent en cas d'erreur. Plusieurs d'entre eux ont signifié qu'ils aimeraient que son usage soit étendu car il n'est pas systématisé.

Pourquoi donc une telle différence d'approche ? Catégorisation causale d'un côté (CatégoDéfo), catégorisation descriptive de l'autre (ClassifiMotif). La première raison est avant tout technique. Il est plus simple, au vu des capacités techniques actuellement mises en œuvre, de différencier des défauts que des motifs. On peut faire l'hypothèse que si des liens pouvaient être établis avec fiabilité entre les origines des motifs, et leur visualisation graphique, la tâche serait rapidement automatisée. Une deuxième raison tient à la place que tient chacune de ces tâches dans le processus d'analyse : l'automatisation des tâches plus annexes apparaît moins comme une menace pour l'identité professionnelle que d'autres tâches plus centrales (Mayer et Strich 2024). Pour les techniciens, l'opération de classification des défauts (de plus en plus assurée par le CatégoDéfo) est bien un préalable à l'analyse qualité, mais elle n'en constitue pas le cœur. Elle est vécue comme une tâche pénible : il faut classer des dizaines voire des centaines de défauts par plaque, ce qui s'apparente à travail d'exécution machinal, peu valorisé par les techniciens eux-mêmes. Au contraire, la dimension analytique de l'investigation des problèmes de qualité est tout à fait centrale dans leur métier. Dans le service Qualité, chaque résolution de problème débute par la rédaction et la circulation des rapports d'analyse des techniciens, qui sont à ce titre une ressource et un travail précieux[271]. La classification causale automatisée des défauts est le facilitateur de ces rapports, tandis que la classification causale automatisée des motifs en signerait la clôture[272].

Les membres de l'équipe IA ont parfaitement conscience des enjeux de répartition du travail qui entourent leur processus de conception. Ils sentent comment la conception du système renvoie également à une conception du travail. A plusieurs reprises, ils expliquent à d'autres ingénieurs leur souhait d'éviter au maximum de créer des catégories causales dans le *dataset* du ClassifiMotif, pour préserver le travail d'analyse des techniciens[273]. En dépit de ces précautions, en automatisant partiellement la tâche d'analyse, l'équipe IA contribue à ouvrir la brèche de l'automatisation de l'analyse qualité. S'ils souhaitent

[271] On peut également mettre en parallèle cette réflexion avec les critiques émergentes dans le domaine de la traduction. Des collectifs de traducteurs (En Chair et en Os, IAlerte-générale) se sont constitués pour fustiger l'évolution des demandes de clients et d'agences, qui basculent vers un travail de post-édition. Il s'agit de relire et corriger des textes pré-traduits par des systèmes automatisés (Robert 2010). La pratique, qui s'accompagne d'une plus faible rémunération des traducteurs, tend à se diffuser avec les dispositifs d'IA générative. Dans l'atelier qualité comme pour la traduction, l'automatisation des tâches conduit à un travail de vérification. Pour autant, la réception par les professionnels est différente. On peut estimer que les tâches partiellement automatisées n'ont pas la même centralité dans les deux activités. Là où la traduction du texte représente le cœur du travail des traducteurs, la classification des défauts n'est qu'un préalable à l'analyse.

[272] Cette situation n'est pas nécessairement stabilisée : si le but est de réduire le temps alloué à chaque rapport d'analyse, cette tâche pourrait elle-même se voir considérée comme fastidieuse, et répétitive.

[273] Ce n'est pas une pratique isolée. Y. Ferguson et ses collègues (2024) observent dans le service qualité d'une entreprise de l'industrie agro-alimentaire, le développement d'un cobot. Alors que ce cobot aurait pu réaliser une partie du travail d'analyse, le collectif impliqué dans le projet a décidé de le cantonner à des tâches plus manuelles.

l'éviter à titre individuel, cela reste un objectif poursuivi par leur hiérarchie (**III.**1.a), et auquel ils participent malgré eux.

« Ils avaient des noms, mais on a tout de suite compris qu'on allait mettre d'autres noms »

Dans les premiers temps du projet de conception du ClassifiMotif, en amont de la collecte des données empiriques utiles à la thèse, un stagiaire est recruté pour interroger les ingénieurs du service Qualité et recenser, auprès d'eux, les différents motifs existants. Tout est à construire, il n'existe pas de standard. A la suite de ce stagiaire, Claude s'enquiert du point de vue des ateliers de production. Il constate de nombreuses disparités dans les qualifications utilisées par les salariés, selon leur appartenance à tel service, tel atelier de SemiCorp. Alors que les catégories font l'objet de débats collectifs que Claude juge interminables, il estime nécessaire de trancher. En particulier, certaines dénominations lui paraissent d'emblée inadaptées. « Ils avaient des noms », explique-t-il, « mais on a tout de suite compris qu'on allait mettre d'autres noms[274]. » Pour Claude, le problème réside, à ce moment, dans la nature causale des qualificatifs, piégeuse selon lui, car plusieurs causes distinctes peuvent mener à des conséquences similaires. C'est pourquoi il cherche à orienter les dénominations le plus possible vers des catégories descriptives.

Au-delà des catégories existantes dans le *dataset*, il s'avère tout aussi intéressant de se pencher sur celles qui n'y sont pas, ou plus. L'exemple du motif « griffe » (devenu « trait »), raconté par Claude[275], est tout particulièrement éclairant. Ce motif fait référence à une problématique récurrente : il peut arriver que la pointe d'un instrument, mal positionnée, puisse rayer une plaque en se déplaçant horizontalement. Elle produit alors une zébrure qui endommage la plaque : la « griffe ». Le service Qualité a repéré que ce dysfonctionnement était lié au calibrage de certaines machines dans un atelier particulier. Le motif « griffe » a ainsi progressivement été associé à cet atelier spécifique dans l'imaginaire collectif. D'une certaine façon, la « griffe », d'abord descriptive, est ainsi devenue une catégorie causale. Une « griffe » indiquait désormais un problème venu de machines présentes dans l'atelier en question. Or, il est apparu que d'autres causes pouvaient produire les mêmes effets, et des « griffes » pouvaient émaner d'autres origines. A de multiples reprises, l'atelier incriminé a été sommé d'effectuer des réparations de machines alors que celles-ci étaient parfaitement fonctionnelles. Ces bévues sont allées jusqu'à occasionner des tensions interpersonnelles entre des salariés du service Qualité et ceux de l'atelier. Au moment de créer le *dataset*, et pour éliminer ces représentations préalables, Claude et l'équipe IA ont décidé de transformer la « griffe » en « trait ». Le nom a changé, même si les données qui servent à qualifier cette catégorie sont les mêmes. La catégorie, en changeant seulement de nom, a repris son caractère descriptif.

Ce faisant, l'équipe IA assume la nature délibérément normative du travail de catégorisation, qui vise à diffuser un nouveau standard d'appellation auprès du service Qualité. Leur visée n'est pas seulement technique, elle est aussi organisationnelle.

[274] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2023.

[275] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juin 2022.

Conclusion (III.2)

La constitution des bases de données s'inscrit dans un processus épistémique qui cherche à produire des « machines à prédire » (Vayre 2018). Ce travail, organisé et réparti entre différents acteurs, est livré selon différentes tâches que nous avons détaillées : catégorisation, annotation, peuplement. Si elles constituent des activités qui rythment la vie d'une base de données, celle-ci évolue selon un cycle de transformation perpétuelle qui vise à augmenter l'efficacité du système d'IA qui s'en nourrit.

Dans le contexte industriel de SemiCorp, l'essentiel du travail de la base de données est en fait à la charge des ingénieurs de l'équipe IA. Contrairement à la majorité des cas traités dans la littérature, la conception des systèmes d'IA industriels paraît suivre la voie d'une centralisation verticale. Les tâches d'annotation, traditionnellement attribuées à des experts ou à des profanes en cours de qualification, leur sont réservées ; la catégorisation repose ultimement sur leurs décisions ; le peuplement est leur chasse gardée. Les ingénieurs maintiennent une forme d'hégémonie sur le système, et sur la façon dont il peut être intégré dans l'organisation. Cette répartition du travail reste contrainte organisationnellement par les exigences en termes de délais et de performance.

Comme souvent lorsqu'il s'agit de nommer, les enjeux des délibérations autour de la qualification vont plus loin que la qualification elle-même. Elles présument, nous l'avons vu, d'une certaine vision de l'organisation du travail, et des tâches qui peuvent (ou doivent) être préservées de l'automatisation. Nommer des catégories pour un système de classification, même ici dans un cadre technique industriel complexe, revient à assumer des pratiques performatives. Les ingénieurs jouent un rôle dans la « régulation de contrôle » du travail des techniciens, en ayant la possibilité de définir le cadre dans lequel ils pourront exercer certaines tâches (Reynaud 1988). En l'occurrence, l'équipe IA choisit de prendre des précautions pour limiter l'introduction de catégories causales afin de sauvegarder le travail d'analyse. Rien ne l'empêcherait, en théorie, de faire autrement, comme c'est le cas à FrancoSite. D'une certaine façon, la prise de conscience chez les ingénieurs de leur pouvoir de transformation des tâches des techniciens témoigne du jaillissement d'un raisonnement éthique dans la conception du système. Dans le même temps, et paradoxalement, c'est précisément le déploiement de l'IA qui pose le jalon supplémentaire de tentatives futures d'extension de l'automatisation de l'analyse qualité.

3. Transfert ou reconstruction de savoirs ? Des situations empiriques de conception du ClassifiMotif

Afin d'explorer plus en détail les pratiques épistémiques de la conception de bases de données telles qu'elles se déroulent au quotidien, nous proposons d'organiser cette section selon deux vignettes ethnographiques (Schöneich 2021). Elles nous permettront d'explorer en profondeur des situations rencontrées lors de notre étude de terrain, avec l'ambition de rendre compte avec finesse de la richesse de ces observations.

Chacune de ces vignettes intègre, à différents degrés, et dans différents contextes, une participation active de ma part. Je sors à plusieurs reprises de ma position d'observateur pour être un contributeur à part entière du projet, autour de tâches que l'on me confie, sur le mode de la participation observante (Soulé 2008). Cette posture n'est pas toujours facile à assumer et me gêne dans un premier temps : n'y a-t-il pas un risque de forcer ma propre subjectivité dans un récit qui voudrait au contraire s'intégrer dans une analyse objective ? Constatant au contraire que cette mise à contribution est une chance pour renseigner les processus de développement d'IA industrielle, je préfère finalement assumer cette ambiguïté, en tentant de toujours garder à l'esprit la distinction entre ce qui relève de mon expérience vécue, située, et ce qui constitue un élément empirique à contextualiser et analyser. En outre, le fait que les enquêtés me poussent à participer à des activités de catégorisation, d'annotation, de peuplement, dans lesquelles, comme nous le verrons, je deviens parfois une partie prenante active, constitue, de façon originale, un élément de preuve du processus de transformation des savoirs à l'œuvre. Quelques explicitations sont nécessaires avant d'illustrer ce phénomène.

L'IA comme instrument de transformation des savoirs

Lorsque D. Forsythe (1993a) décrit le développement des systèmes-experts dans les années 1980-1990, elle montre comment les cogniticiens (*knowledge engineers*) interrogent les médecins dans le but de récupérer, d'extraire leurs savoirs. Le but, pour les développeurs, est de transcrire ces connaissances dans les systèmes d'IA sur lesquels ils travaillent, de sorte à produire un système-expert, capable des mêmes capacités de raisonnement diagnostic que les professionnels. Ces systèmes ne reposent pas tant sur un apprentissage (« *machine learning* ») que sur l'établissement de règles, d'arbres de décision *ad hoc*, sur la base d'une algorithmisation de la pensée experte.

A la suite de D. Forsythe et au travers de plusieurs études de cas sur des dispositifs similaires, A. Hatchuel et B. Weil (1992) ont montré que cette transcription des savoirs était plutôt une transformation des savoirs. Pour A. Hatchuel et B. Weil, l'expertise ne peut pleinement être intégrée telle quelle dans un système-expert : elle subit nécessairement des distorsions. On peut multiplier les arguments en ce sens :

- La façon dont l'expert décrit sa pratique ne correspond pas nécessairement à sa pratique réelle,
- La façon dont le cogniticien comprend la pratique de l'expert ne correspond pas nécessairement à la description qui lui en est faite,
- La façon dont le cogniticien intègre cette connaissance dans le système ne correspond pas nécessairement à ce qu'il en a compris,

- La façon dont le système fournit ses résultats ne correspond pas nécessairement à ce qui en est attendu compte tenu des connaissances transmises[276].

Toutes ces interfaces sociotechniques, qu'elles soient matérielles, organisationnelles, sociales, constituent autant d'étapes de transformation des savoirs dont on peut douter, de toute façon, du caractère délimitable et explicitable.

Alors que les méthodes de l'IA évoluent et que les réseaux de neurones se positionnent désormais comme les modèles d'apprentissage machine les plus performants (Cardon et al. 2018), nous pourrions être tentés de balayer cette idée d'une « transformation des savoirs ». Puisqu'il devient possible pour les experts eux-mêmes d'annoter les données, comme c'est le cas dans beaucoup d'applications (para-)médicales de l'IA, une partie des obstacles à une pure transcription des savoirs pourrait disparaître.

La réalité paraît contredire cet espoir. L'une des raisons tient d'abord au fonctionnement de l'entraînement des systèmes d'apprentissage machine supervisé. Puisque les bases de données sont uniquement constituées d'exemples annotés, elles ne contiennent que le résultat de ces annotations, sans intégrer la dynamique de décision. Dans le cas du ClassifiMotif par exemple, les annotations (« tache », « spirale droite ») correspondent au résultat de l'annotation, mais n'indiquent pas la manière dont celle-ci a été décidée. Par ailleurs, l'on pourrait s'attendre à ce que les techniciens qualité, qui sont ceux qui sont confrontés à ces motifs en première instance, soient chargés de fournir des annotations au système pour contribuer à son entraînement. Ce n'est pas le cas en pratique. Comme nous le montrerons, tout est reconstruit par les ingénieurs de l'équipe IA, qui pilotent la « transformation des savoirs ».

Pour illustrer ce phénomène de transformations des savoirs, nous débuterons par le récit d'une expérience personnelle de nettoyage de base de données, qui s'inscrit dans un processus de production de données synthétiques (3.a). Dans un second temps, nous traiterons de la négociation catégorielle de la classe « spirale » en relatant une réunion dédiée à sa définition, riche en enseignements sur les modalités collectives de transformation des savoirs (3.b).

[276] On retrouve là la version sociotechnique de la fameuse petite phrase de l'écrivain Bernard Werber : « Entre ce que je pense, ce que je veux dire, ce que je crois dire, ce que je dis, ce que vous voulez entendre, ce que vous entendez, ce que vous croyez en comprendre, ce que vous voulez comprendre, et ce que vous comprenez, il y a au moins neuf possibilités de ne pas se comprendre. »

3.a. Nettoyer des bases de données synthétiques

Nous sommes en décembre 2022. Ce jour-là, Jérôme me confie une mission : nettoyer la classe « tache » de la base de données d'entraînement du ClassifiMotif. Dans le cadre de la refonte du *dataset* engagée en collaboration avec Delphine (équipe Suivi Temps Réel), Jérôme souhaite affiner la catégorie « tache ». La démarche qu'ils portent vise à établir des critères clairs de cohérence dans la construction de la base de données, puis à les appliquer. Ils ont constaté, en parcourant la catégorie « tache », la présence de motifs bien délimités, et d'autres qui ne l'étaient pas, ou moins, voir (Figure 53). Par ce travail de peuplement – ici plus précisément de dépeuplement puisqu'il est question de retirer des données – le but est d'améliorer la qualité de la base de données, avec l'ambition d'améliorer les performances du ClassifiMotif.

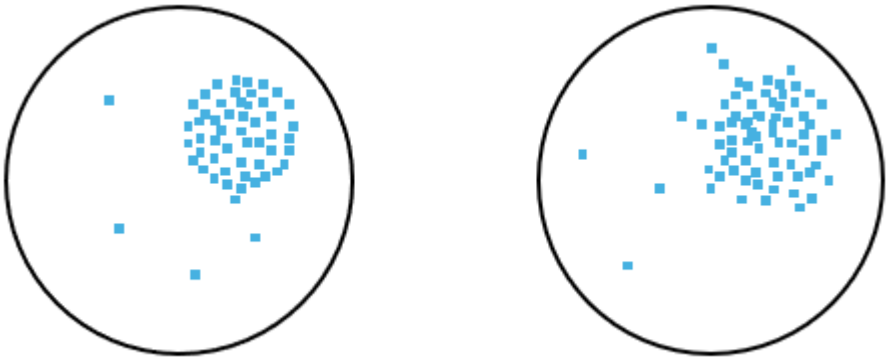


Figure 53 : A gauche, une tache bien délimitée, à droite, une tache qui ne l'est pas, le motif n'est pas pleinement circulaire.

Tandis que Jérôme se met à plancher sur une autre catégorie qu'il souhaite lui-même nettoyer, je me mets au travail. L'interface, hébergée sur un serveur interne de SemiCorp, demande un peu de prise en main. Je tâtonne et tâche de me rappeler de fois passées où j'ai vu Jérôme m'expliquer l'organisation du site[277]. Je dois d'abord ouvrir la bonne version de la base de données (c'est la V.8), parmi l'ensemble des bases de données proposées. Les bases de données de FrancoSite et d'EuroSite sont en effet stockées au même endroit que les différentes versions du *dataset* de ThèseSite. Je clique ensuite sur la classe « tache », d'où je peux désormais visionner l'ensemble des deux mille échantillons présents dans la base de données. L'interface se présente sous la forme d'un tableau montrant les plaques, avec, pour chacune, de nombreux champs permettant de la caractériser : numéro du lot, numéro de la plaque dans le lot (de 1 à 25 puisqu'il y a vingt-cinq plaques par lot en général), date et heure de l'inspection, machine d'inspection utilisée, et image de la plaque, sur laquelle l'on peut cliquer pour en avoir une meilleure vue, voir (Figure 54). Les dernières colonnes, inutiles dans le cas présent, indiquent respectivement, pour les plaques concernées, la classe de motif assignée par la dernière version du ClassifiMotif en « mode *shadow* » (connectée aux données de la production, mais sans avoir d'effets sur elle, ce système ne déclenche pas d'alertes, nous y reviendrons) ou par Jérôme lui-même, de façon supervisée et *a posteriori*. Enfin, il est possible, pour chaque colonne, d'effectuer un tri nominatif, par exemple pour ne retenir que les plaques qui ont été inspectées par une machine particulière.

[277] En réalité, un fichier a été rédigé en guise de tutoriel, mais je ne pense pas à l'utiliser sur le coup.

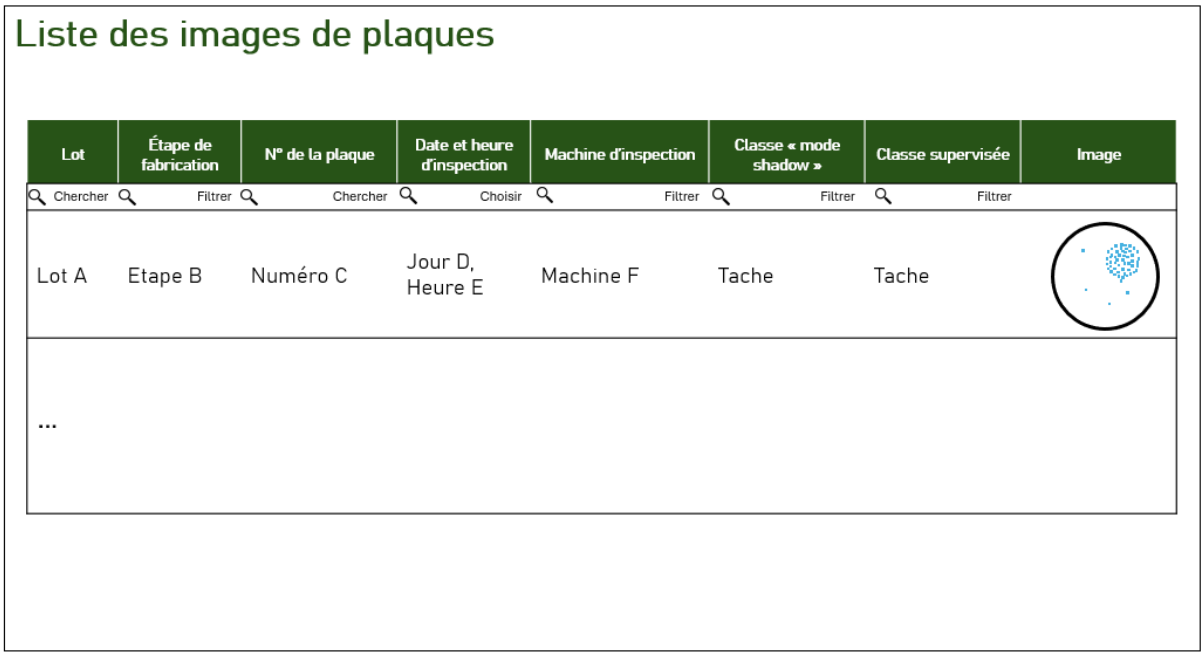


Figure 54 : Interface logicielle de visualisation des plaques (reproduction altérée). Il faut imaginer que le tableau comporte cinquante lignes de même nature (non reproduites ici) plutôt qu'une.

Faire l'expérience du (dé-)peuplement d'une base de données

Pour nettoyer la base, il me faut supprimer les plaques incorrectes une à une, en cliquant sur une petite croix puis en cliquant sur « confirmer ». La dimension matérielle de l'usage du numérique, chère à P. Leonardi (2010), se rappelle à moi avec grand fracas : le site est plus lent que ceux que j'ai l'habitude d'utiliser, la confirmation n'est pas instantanée et chaque suppression de plaque prend deux à trois secondes. Le dispositif s'en trouve frustrant, car la sensation d'immédiateté auquel les systèmes numériques peuvent habituer n'est pas assurée ici. A plusieurs reprises, je me retourne pour montrer à Jérôme des exemples ambigus (le disque est bien rond mais peu dense, le disque est incomplet) afin de lui faire confirmer s'il souhaite conserver ou pas ce type de données dans le *dataset*. Ces précisions, obtenues à l'oral de façon informelle, ne figurent pas dans les consignes qu'il m'a données initialement. Implicites, elles émergent, comme souvent, de la confrontation avec les données annotées. Plus j'avance dans mon entreprise, et moins je consulte Jérôme.

La besogne me devient rapidement pénible, elle n'est pas particulièrement intéressante. J'ai mis mon casque et de la musique.

Je déroule le menu, clique sur une plaque pour l'afficher en plus gros et vérifier qu'elle est valide, elle l'est alors je passe à la suivante, l'agrandit, la supprime en cliquant sur la croix puis sur le bouton « confirmer », continue de dérouler le menu, supprime une autre plaque, confirme, reviens en arrière car la plaque que je viens de supprimer ressemble beaucoup à l'une des précédentes, que j'avais initialement conservée, mais que je vais finalement supprimer. Les plaques s'affichent par paquets de cent, si bien que je me vois progresser petit à petit. Arrivé en bas d'un paquet, je jette un dernier coup d'œil aux plaques restantes pour vérifier n'en avoir oublié aucune, et puis je passe à la page suivante. Il y a en tout deux mille plaques à traiter.

« Et Louis, il sait faire ? » : qualifier la qualification de la tâche

Jérôme m'a demandé de compter les plaques que je supprimais afin d'estimer le degré de réduction de la catégorie « tache ». La suppression de la base de données est définitive. C'est un peu stressant, car l'erreur n'est pas réparable facilement[278]. Comme je suis bien incapable de tenir le compte de tête, je fais des traits sur mon carnet de terrain. Droitier, je perds du temps à lâcher ma souris pour inscrire un nouveau bâton à chaque plaque supprimée. Alors je finis par me saisir de mon stylo de la main gauche pour incrémenter mon compte, en conservant la souris dans ma main droite. C'est pour avancer plus vite que je développe cette stratégie car, franchement, je m'ennuie, alors même que j'ai bien conscience de l'intérêt de cette expérience pratique pour mon travail de recherche.

Au bout d'un moment, Elodie, l'une des ingénieures du service Qualité (équipe Amélioration Qualité) vient discuter avec Jérôme, lui demande ce que nous faisons. Jérôme lui répond que nous sommes en train de nettoyer la base de données. Elodie se tourne alors vers moi et lui demande : « Et Louis, il sait faire ? » La question est absolument pertinente : après tout, je ne suis pas formé en qualité dans la micro-électronique. Elle amène à questionner plusieurs perspectives. D'abord celle d'Elodie, qui perçoit dans l'exercice une certaine difficulté, une forme d'expertise, et qui se trouve surprise de voir un néophyte le réaliser. Celle de Jérôme ensuite, qui m'a confié ce travail en ayant confiance en ma capacité à le mettre en œuvre. Et puis la mienne, qui ait accepté de m'atteler au nettoyage sans vraiment me questionner sur ma légitimité[279]. L'interrogation soulevée par Elodie informe sur la dualité de la tâche de nettoyage, qui, de l'extérieur, apparaît d'une complexité supérieure à ce qu'elle représente pour ceux qui la réalisent au quotidien. Le développement du système de traitement d'images introduit en fait des tâches relativement peu complexes, décorrélées du champ de l'ingénierie en micro-électronique.

Au fur et à mesure du nettoyage, je fais un constat curieux : toutes les plaques que je supprime (environ une sur cinq) se ressemblent. Elles sont inadéquates… de la même façon. Je remarque en creusant un peu que les noms de ces plaques se concluent quasiment tous par un énigmatique « config6 » ou « config7 ». D'un autre côté, quasiment toutes les plaques ne se nommant pas ainsi correspondent à la définition que m'a donnée Jérôme. Je commence donc à filtrer les résultats pour vérifier ces plaques en particulier. Cela me simplifie beaucoup le travail car mon attention est plus facilement dirigée vers des échantillons dont je sais d'emblée qu'ils sont suspicieux. Une fois toutes ces plaques traitées, je repasse sur celles que je n'ai pas visionnées, avec un plus faible degré de vigilance, car je sais que j'ai enlevé le gros des plaques problématiques.

Au bout de deux heures qui m'ont paru relativement longues, je termine le travail de désambiguation du motif « tache » qui m'a été attribué[280]. En tout, il y a une vingtaine de classes à traiter de la même façon, ce qui donne une idée du temps nécessaire à s'occuper de la base de données dans son entièreté.

[278] En pratique, il n'est pas trop difficile de trouver une autre plaque pour en remplacer une manquante, mais, de toute façon, le fait qu'il puisse y avoir une plaque de plus ou de moins dans une base de données en comptant plusieurs milliers ne change pas grand-chose.

[279] La réalisation de ce type de tâches de soutien à la conception du ClassifiMotif a également été pour moi l'occasion de rendre service, de sorte à justifier et consolider ma présence sur le terrain, suivant une forme de rétribution par le service (Markou et al. 2024).

[280] Pour des équipes d'annotateurs salariés, le travail une même tâche répétitive peut durer des semaines avant qu'une nouvelle tâche ne leur soit confiée (Chandhiramowuli et al. 2024:16).

Certaines classes n'ont quasiment pas besoin d'être modifiées là où d'autres demandent une attention plus particulière[281].

Dessine-moi une donnée : les données synthétiques

« config6 », « config7 », de quoi s'agit-il ? Pourquoi les motifs incriminés étaient-ils en quelque sorte prétriés selon ces noms ? et pourquoi se ressemblaient-ils tous ? La réponse est simple : parce qu'ils ont été dessinés automatiquement. Proposons un petit retour en arrière biographique pour comprendre l'origine de ces données, dites synthétiques.

Comme nous l'avons expliqué à plusieurs reprises (**III.**1.a, **III.**2.c), au début de la conception du ClassifiMotif, Claude commence à développer le système de détection de motifs seul, en s'intéressant aux approches suivies par deux autres sites : EuroSite et FrancoSite, voir (Tableau 8). A EuroSite, les données de production, qui ont été conservées depuis des années par le service Qualité, se révèlent être de grande valeur pour alimenter des bases de données. EuroSite ne dispose cependant pas de suffisamment d'exemples pour entraîner son ClassifiMotif local. Son service Qualité déploie alors le système en production en créant un poste de technicien, à raison d'une ou deux heures sur un *shift*. Le but de ce poste est de visualiser toutes les cartographies de plaque passant dans l'atelier qualité pour vérifier les résultats du système, mais aussi pour découvrir d'éventuels nouveaux motifs qui n'étaient pas pris en compte jusque-là. Les techniciens concernés portent alors un rôle d'amélioration indirecte du système, à laquelle ils contribuent.

De son côté, à ThèseSite, Claude se rend compte qu'il est difficile de trouver des exemples pour certains motifs de défauts spécifiques[282]. Ces motifs, rares, n'apparaissent pas souvent dans l'atelier du service Qualité. Il est difficile, dans ces conditions, d'en collecter suffisamment pour alimenter la base de données (il faudrait plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'exemples pour chaque motif). La solution d'EuroSite prend trop de temps, elle n'est pas considérée comme viable.

FrancoSite a trouvé une parade pour contrevenir à l'absence d'échantillons : les faire dessiner. Pour cela, ses ingénieurs ont développé un logiciel de dessin numérique de plaques. Le principe de ce logiciel est de générer automatiquement des KLARF, les fichiers qui permettent d'extraire des cartographies des plaques. Parmi les paramètres de chaque fichier, on compte justement la liste des coordonnées des défauts. Pour un motif donné, le logiciel peut ainsi créer de toute pièce des fichiers KLARF qui présentent ce motif. Plusieurs options permettent de simuler une variété dans les fichiers créés : des défauts peuvent être ajoutés de façon aléatoire sur les plaques, les motifs peuvent être positionnés à différents endroits et présenter des densités différentes. Il est possible d'établir différentes configurations, de sorte à créer des données qui *ressemblent* à des données réelles.

Claude est emballé. D'un commun accord avec son manager direct, ils basculent vers la solution de FrancoSite. Cependant, les premiers résultats ne leur conviennent pas. Utilisées comme base d'entraînement pour le ClassifiMotif, les données synthétiques seules n'offrent pas suffisamment de

[281] J'ai par la suite contribué à nettoyer d'autres classes, pour lesquelles cela a été plus rapide.

[282] Les bases de données ne sont pas partagées entre les sites, car ce ne sont pas les mêmes produits qui y sont fabriqués, et car les approches ne sont pas nécessairement les mêmes.

bonnes performances de classification. L'idée vient alors à Claude de combiner les propositions d'EuroSite et de FrancoSite en additionnant plaques réelles et plaques synthétiques dans la base de données. L'objectif est d'homogénéiser les pratiques et de pérenniser le projet en combinant deux solutions qui pallient chacune les défauts de l'autre. Les données réelles permettent d'apporter des exemples singuliers, là où les données synthétiques contribuent à agrandir largement la base de données. A l'automne 2022, le *dataset* du ClassifiMotif contient environ 98% de données synthétiques et 2% de données réelles. Jérôme a repris la main sur le projet mais considère que les données synthétiques sont toujours une nécessité : « [N'avoir] que les situations réelles ça prendrait des années… heureusement qu'on a pas deux mille motifs régulièrement [en production][283]. »

Quelques mois plus tard, alors que je viens de nettoyer le motif « tache », j'ai en fait supprimé tout un ensemble de données synthétiques qui ne sont désormais plus considérées comme représentant de façon adéquate le motif. Les plaques « config6 » et « config7 » sont justement des configurations dessinées spécifiques qui ne correspondent plus au canon que souhaite appliquer Jérôme à la classe « tache ».

Service Qualité de…	EuroSite	FrancoSite	ThèseSite
Approche suivie pour peupler le *dataset* du ClassifiMotif (à un moment t)	Collecte de données réelles annotées par les techniciens	Création de données synthétiques	Hybride, avec des données annotées par les ingénieurs et des données synthétiques

Tableau 8 : Approches de constitution des bases de données des ClassifiMotif à SemiCorp.

Promesses des données synthétiques

Comment analyser cette situation ? Il nous faut pour cela revenir sur la nature de ces « données synthétiques[284] ». Les données synthétiques sont des imitations de données réelles, dont le but est non pas d'être diffusées telles quelles[285], mais d'entraîner ou d'évaluer des systèmes apprenants (Jacobsen 2023). En les générant, les producteurs de données cherchent à obtenir des données réalistes, plausibles, qui auraient pu être véritablement captées, mesurées (Jacobsen 2023). Elles sont utilisées, comme n'importe quelle donnée réelle, pour entraîner les algorithmes d'apprentissage machine, et peuvent également servir à protéger la vie privée[286] (Offenhuber 2024).

Au travers d'une large revue de matériel empirique daté des années 1970 à nos jours (littérature scientifique, promotion commerciale, webinaires d'entreprises), L. Ravn (2025) identifie trois recompositions progressives dans la représentation des données synthétiques. Dans le champ scientifique, il montre d'abord que le terme, originellement vernaculaire, technique, s'est peu à peu mué

[283] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en décembre 2022.

[284] On entend ici l'adjectif « synthétique » non pas au sens d'un résumé (rédaction d'une synthèse) mais plutôt comme une génération d'entités (photo-synthèse).

[285] Comme le font remarquer P. Helm et ses collègues (2024:2), l'évocation des données synthétiques dans notre contexte ne relève pas d'un usage malveillant lié à des applications d'IA générative, comme les infox vidéo (*deepfakes*) (de Vries 2020).

[286] Imaginons par exemple une base de données sensibles (comportant par exemple des données de santé de patients). Il est possible de reconstruire une base de données parallèle disposant de propriétés statistiques similaires, mais dont chaque nouvel échantillon individuel ne correspondrait à aucun patient initial.

en un concept scientifique à part entière, un champ de recherche avec sa littérature, ses lacunes (*research gaps*) et ses pistes à explorer. Une deuxième évolution pointée par L. Ravn tient à un changement de statut. De solution « possible », les données synthétiques sont devenues solution « inévitable » pour un certain nombre d'applications. On retrouve spécifiquement ce registre de discours dans les propos de Claude et Jérôme, qui considèrent les données réelles comme insuffisantes (en quantité) pour permettre l'entraînement du ClassifiMotif. Un dernier déplacement repose dans l'intérêt trouvé aux données synthétiques. Dans les années 1970, elles sont initialement envisagées comme une méthode pour résoudre des problèmes techniques de recherche. De nouvelles utilités potentielles sont identifiées dans les années 2010 : les données synthétiques pourraient résoudre des problèmes sociotechniques, notamment ceux liés à la présence de biais dans les bases de données.

Attardons-nous sur cette promesse. Les biais s'entendent généralement comme des formes de préjugés, issus de données situées, qui peuvent être reproduits dans les données et engendrer des inégalités lorsqu'ils concernent des applications liées au recrutement, à la distribution d'aides, ou à la reconnaissance faciale (Buolamwini et Gebru 2018). Dans le contexte industriel, comme nous l'avons vu par exemple à Mecanex (**II.**3.c), les biais peuvent être interprétés différemment. Ils sont des sources d'erreurs et témoignent d'une préparation des données inadéquate : les données sont de mauvaise qualité, ou présentes dans des mauvaises proportions, ou ne concernent pas l'ensemble des cas de figure qui peuvent être rencontrés. L'une des promesses des données synthétiques est justement d'introduire une nouvelle forme de variabilité dans les données (Jacobsen, 2023). Lorsque certaines données manquent à l'appel dans la collecte réelle qui est opérée par l'organisation, elles peuvent être recréées de toute pièce. Un autre argument est celui de la robustesse des systèmes conçus. Des données relatives à des situations inattendues pourraient permettre aux algorithmes d'être plus résistants aux imprévus (Jacobsen 2023).

Synthétiser, introduire une nouvelle normativité

Le recours aux données synthétiques procède en réalité d'une logique technosolutionniste, qui postule que les biais présents dans les données pourraient simplement être éliminés par des méthodes techniques. Comme l'explique B. Jacobsen (2023:4), le raisonnement est le suivant : « Si une donnée ne peut pas être trouvée, elle peut être générée ; si elle pourrait être dans une base de données d'entrainement, c'est qu'elle doit l'être[287]. » B. Jacobsen pointe également du doigt l'importance de facteurs économiques dans le recours aux données synthétiques : les organisations pressées par le déploiement des systèmes d'IA privilégient les solutions qui réduisent les délais d'apprentissage. Dans l'équipe IA, le son de cloche est le même. Pour Claude, il serait « fou », et « pas raisonnable[288] » d'attendre d'avoir suffisamment de données issues seulement de la production pour mettre en production le ClassifiMotif. Conformément aux prérogatives rédigées par leurs collègues d'EuroSite dans un document dédié à la prise en matin du ClassifiMotif, l'équipe IA produit ses données pour simuler la variété des données.

[287] « As the logic goes: If it cannot be found, it can be generated; if it could be in a training dataset it should be » (notre traduction).

[288] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2023.

Or, comme on l'a vu dans le cas du nettoyage de la classe « tache », les données synthétiques introduisent une forme de variabilité relativement limitée, à telle point qu'elle est repérable à l'œil nu, par un profane (moi). Cette variabilité restitue en un sens la vision de ce qui constitue la diversité des données aux yeux des concepteurs. Cet exercice de projection des ingénieurs a déjà été noté dans le cadre de la réalisation de systèmes de vidéosurveillance d'infrastructures nucléaires (Grosman et Reigeluth 2019). Les auteurs montrent comment les ingénieurs créent de toute pièce des situations dans lesquels ils adoptent des comportements qui se veulent inoffensifs ou suspects. Les comportements ainsi recréés et filmés correspondent-ils à des comportements réalistes ? Cela n'est pas vérifié. Pourtant, ce sont ces vidéos qui servent à entraîner et valider le système. Pour reprendre l'un des constats de J. Grosman et T. Reigeluth (2019:4), « *les normes sont instituées par les ingénieurs et sont supposées être suivies par les machines*[289]. »

Automatiser, nettoyer, recommencer

Dans le service Qualité, la production de données synthétiques s'inscrit sous un faisceau de contraintes techniques et organisationnelles relatives à la disponibilité des données, et au temps que le service est prêt à attendre pour voir déployer son dispositif. Les données synthétiques apparaissent comme un ultime recours devant l'immensité du travail de conception des bases de données. Ce faisant, elles participent à introduire une normativité particulière. Est-elle réellement celles des ingénieurs qui s'y affairent ? Pas toujours. Comme s'en étonne Jérôme alors qu'il fait défiler des données : « Y'a plein de config que j'ai jamais vues de ma vie. » Le logiciel de dessin produit des données synthétiques irréalistes. Elles sont issues d'un compromis : pour pouvoir utiliser ce logiciel de dessin, il faut accepter la production de ces données indésirées, déconnectées de ce qui s'observe en salle blanche.

La production des données synthétiques n'efface pas totalement le travail d'annotation, puisqu'elle génère de nouvelles tâches de nettoyage. Malgré l'automatisation (partielle) de l'étiquetage, l'organisation continue à traiter des tâches résiduelles de même nature. Simplement, au lieu d'être traitées par les techniciens en salle blanche – comme c'est le cas à EuroSite –, elles sont désormais renvoyées, dans une moindre proportion certes mais renvoyées tout de même, aux ingénieurs des bureaux. Au lieu d'un déplacement du travail vers des populations précaires, comme l'ont montré les travaux du DiPLab que nous avons déjà cités, on voit ici que le travail peut être déplacé vers des travailleurs considérés comme plus qualifiés.

[289] « [*T*]*he norms are instituted by the engineers and are expected to be followed by the machines* » (notre traduction, en italique dans le texte).

3.b. La réunion des spirales : histoire mouvementée de l'élaboration d'une catégorie

C'est aujourd'hui qu'a lieu la « réunion des spirales[290] ». Je l'attends avec une certaine impatience depuis plusieurs semaines déjà. L'événement est suffisamment peu urgent pour avoir été annulé à plusieurs reprises, mais suffisamment important pour qu'il ait été systématiquement reprogrammé. Il est organisé par l'équipe IA, et se tient en petit comité. Jérôme, responsable de la conception du ClassifiMotif, la co-anime avec Delphine, en charge de l'équipe Suivi Temps Réel. Cette équipe est la plus proche de la salle blanche, elles communiquent ensemble en continu. L'équipe Suivi Temps Réel est notamment celle qui reçoit et valide les rapports d'analyse qualité réalisés par les techniciens qualité. En tant que responsable de ce groupe, Delphine a progressivement été intégrée au processus de conception du ClassifiMotif. Son équipe est concernée par le système puisque celui-ci sera à l'origine d'alertes, traitées d'abord par les techniciens avant qu'elles ne soient communiquées vers les bureaux *via* l'équipe Suivi Temps Réel.

J'accompagne Delphine jusqu'à la salle de réunion. Pressentant d'avance l'intérêt sociologique de ce temps collectif, je lui glisse, métaphoriquement certes mais pas ironiquement pour un sou, qu'assister à cette réunion des spirales, « j'en ai rêvé ». A ma surprise, elle me répond qu'elle aussi, mais « pour de vrai ». Elle me raconte que la nuit même, elle a fait un cauchemar dans lequel une erreur de classification anodine entraînait, par ricochets, des conséquences terribles pour le service Qualité. « Je me relève fatiguée », me dit-elle. Les alertes qualité continuent à sonner même quand les salariés ne sont plus là pour les entendre.

Nous nous mettons autour de la table en compagnie d'une autre ingénieure du service Qualité tandis que deux responsables d'équipe de production sont présents en visioconférence. Chacun d'eux opère depuis un atelier différent : le premier atelier (Nettoyage) intègre des processus de nettoyage des plaques tandis que le second (Photolithographie) s'occupe des étapes de photolithographie.

Pourquoi ces salariés fort occupés[291] se sont-ils réunis l'espace d'une heure ? La raison est simple : il faut définir ce qu'est une spirale. L'énoncer de cette façon paraît trivial, presque absurde, mais en réalité, la quête n'est absolument pas évidente. Pour preuve, gâchons la surprise : ils n'y parviendront pas.

Depuis quelques mois, Jérôme collabore avec Delphine dans l'idée de réaliser un nouvel herbier, ils ont décidé de repartir sur de nouvelles bases par rapport à l'herbier existant. Ce qui motive avant tout cet aplanissement catégoriel (qui fait plutôt office de clarification que de véritable table rase), c'est l'ambition d'améliorer les performances du ClassifiMotif, qui semblent avoir atteint un plafond.

Parmi les motifs en figurent deux qui nous intéressent ce jour-là, appelés les motifs tournants : « spirale gauche » et « spirale droite », voir (Figure 55). Ils sont généralement dus à des instruments mal positionnés, qui rayent la plaque alors qu'elle est en rotation. Seulement voilà : laquelle des spirales est

[290] La situation décrite a lieu en janvier 2023.

[291] Nos demandes d'entretien ont été accueillis sans enthousiasme par les responsables de SemiCorp, car ils auraient eu lieu lors des horaires de travail (et n'étaient pas considérés comme tels), c'est l'une des raisons pour lesquelles nous n'en avons pas réalisé. A Mecanex au contraire, les entretiens étaient perçus comme des temps de travail en soi, qui ont mené les équipes à des réflexions collectives par la suite et en notre absence.

la gauche ? et laquelle des spirales est la droite ? C'est tout l'enjeu de la réunion que de le décider. Jérôme et Delphine ont demandé ce temps aux responsables des ateliers de production pour tomber d'accord sur une dénomination et sur une définition.

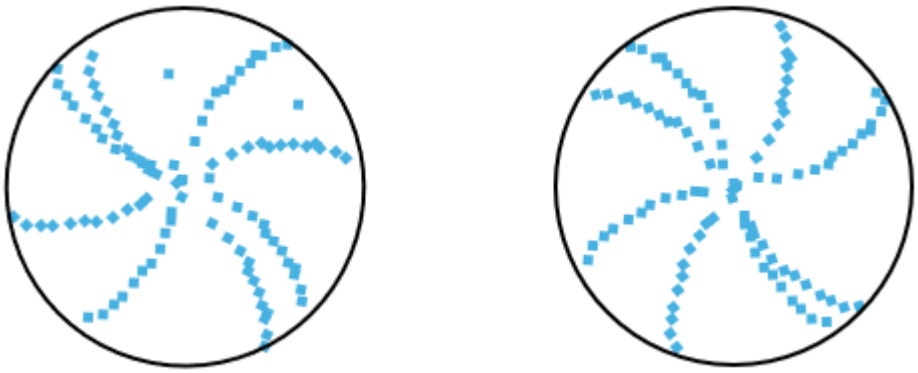


Figure 55 : Des exemples de spirales, avec des sens de rotation opposés : l'une est une spirale gauche, l'autre est une spirale droite. L'objectif de la réunion est de s'accorder sur laquelle est laquelle.

Une stratégie d'acceptation par la constitution d'alliances

Le but de la réunion, selon les termes de Jérôme et de Delphine, est d'adopter une même « convention ». Delphine explique ainsi aux autres participants : « L'objectif de tout ce qu'on fait avec Jérôme c'est de donner confiance. Si nous on l'appelle gauche et qu'à l'atelier Nettoyage ils l'appellent droite ça part mal. » La recherche du consensus sur le langage utilisé par l'ensemble des salariés sert ainsi à s'assurer du bon accueil du ClassifiMotif par les équipes. La réunion organisée par l'équipe IA s'inscrit ici dans une stratégie d'acceptation (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009) du système en cherchant à vérifier son adéquation – sur le plan symbolique – avec les pratiques de désignation existantes. Pour reprendre la terminologie de la théorie de l'acteur-réseau, l'équipe IA cherche ici à enrôler les acteurs adjacents au service Qualité pour construire ensemble un répertoire commun de savoirs. Cette stratégie tranche avec celle de l'acceptabilité, que nous évoquions à propos de l'intégration des promesses dans la rhétorique de motivation des projets d'IA (**II.**2.b).

La posture adoptée par l'équipe IA dépasse bien entendu cette seule phase de conception. Dès que l'occasion se présente, ses membres et en particulier Régis, le manager, cherchent à se rendre utiles auprès d'autres groupes de salariés. Régis explique par exemple un jour, après s'être engagé dans un problème de logistique qui ne le concernait que vaguement : « C'est pas forcément à moi de résoudre [ce problème] […]. Je résous un irritant, je me fais des alliés[292]. » En se montrant coopératif avec le reste du service, il espère obtenir, en retour, une assistance dans le déploiement du système. Ce soutien peut notamment se traduire par du temps pris pour travailler ensemble sur les problématiques de l'équipe IA. Son but reste de favoriser le déploiement du système. On voit ici comment, dans la réunion des spirales, se prolonge cette stratégie d'acceptation. Elle reste ici limitée, au sens où elle favorise une collaboration sur un pan relativement restreint de la conception du ClassifiMotif, et où elle ne convie qu'une sélection minime d'acteurs amenés à y contribuer. Malgré tout, elle provoque la discussion et permet de faire bénéficier aux ateliers de production d'une fenêtre sur le déploiement des systèmes d'IA qui, à terme,

[292] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en janvier 2023.

pourraient conduire à des alertes qui les concerneront. Dans le contexte organisationnel, permettre à des collègues d'anticiper des changements notables est perçu de façon positive.

Spirale droite, spirale gauche : un débat étrangement stimulant

Quelques jours auparavant, Jérôme me confie, en plaisantant, son désarroi face à cette tâche qu'il trouve vide de sens : « On a fait des études d'ingé, on a fait des calculs et tout, et maintenant on se demande si c'est droite ou gauche[293]. » La trivialité du problème à résoudre lui paraît incompatible avec l'idée qu'il se fait de son métier. En un sens, le travail de l'IA peut ainsi produire un sentiment de déqualification, tout du moins d'inadéquation entre le travail espéré, et le travail réalisé.

Pourtant, le jour de la réunion, les deux responsables de production se montrent stimulés par la question, qu'ils ont transmise à leurs équipes. L'un d'entre eux s'exclame qu'elle les a « chamboulés » et menés à d'âpres discussions. La définition des spirales suscite un véritable intérêt en alimentant des échanges riches autour de ce qui reste de l'ordre du savoir tacite, sur un thème inattendu et en réalité rarement explicité. Delphine le reconnaît elle-même auprès des participants de la réunion : « Nous depuis qu'on a eu cette discussion avec Jérôme il y a tout le monde qui se fout de notre gueule car personne voit le truc pareil. »

Et effectivement : il y a désaccord. Certains voient une spirale droite là où d'autres voient une spirale gauche, et inversement. Il apparaît rapidement que l'un des facteurs de divergence concerne la façon dont chacun des participants de la réunion se représente le tracé d'un motif « spirale ». Pour expliciter sa propre vision, Jérôme propose une description géométrique à l'aide d'un schéma projeté à l'écran : les bras d'une spirale droite sont convexes par rapport à l'axe des abscisses, tandis que ceux de la spirale gauche sont concaves par rapport à ce même axe, voir (Figure 56). La définition ainsi décrite est incomplète, ce que reconnaît Delphine, car il faut impérativement prendre pour repère les bras situés dans le cadran nord-est de la plaque.

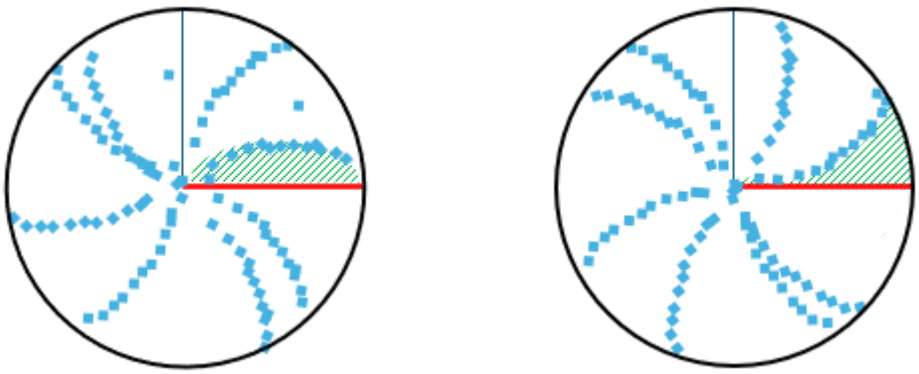


Figure 56 : Schéma d'explicitation de la méthode convexe-concave de Jérôme pour différencier les spirales. A gauche le bord est concave (arrondi vers l'intérieur) par rapport à l'axe des abscisses : c'est une spirale gauche. A droite, le bord est convexe (arrondi vers l'extérieur) : c'est une spirale droite.

[293] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en décembre 2022.

Cependant, cette proposition ne correspond pas à la manière dont le responsable de l'atelier Nettoyage se représente les choses. Il explique : « [Ce qu'explique Jérôme], ça marche bien si on vient du bord de plaque […] mais l'éjection se fait du centre vers le bord de la plaque. » La vision du responsable d'atelier découle non pas d'une perception de la forme géométrique du motif, mais plutôt de sa réalisation effective, mécanique, dans le cadre d'un processus de fabrication. Dans l'atelier Nettoyage, une spirale est le résultat d'un mouvement rectiligne d'un objet *rayeur* sur une plaque tournante *rayée*. C'est avec cette visualisation en tête que le responsable de l'atelier s'exprime. Delphine résume ainsi le débat : « C'est que ça dépend si on considère que c'est le motif ou la plaque qui tourne. »

Pour le dire grossièrement, les ingénieurs, depuis les bureaux, voient un motif géométrique là où, dans les ateliers de production, c'est un phénomène physique, mécanique qui est observé. Au travers de ce clivage définitionnel se rejoue en réalité une confrontation entre différents modes d'appréciation du réel : plus abstrait (*via* les logiciels de visualisation des défauts sur les plaques) ou plus concret (par la perception physique des plaques fabriquées).

Contraintes organisationnelles aux alternatives catégorielles

Le problème dans l'établissement de la convention tient également à l'usage de la disjonction « droite » / « gauche » pour évoquer des formes géométriques circulaires qui n'ont, par nature, ni droite ni gauche. L'ingénieure du service Qualité présente suggère, pour les remplacer, de parler de spirale en sens horaire, ou en sens anti-horaire. Cette possibilité, plus intuitive et qui semble satisfaire l'ensemble des participants, est rapidement mise de côté car le changement du nom des motifs est une procédure trop complexe pour Jérôme. Il ne peut la réaliser lui-même compte tenu de sa dépendance au service Informatique, lui-même dépendant du cabinet de conseil auquel est sous-traité le développement algorithmique du ClassifiMotif. Les contraintes sont techniques mais aussi organisationnelles. Pour ne pas ajouter un surcroît de travail, il est dès lors nécessaire de garder les noms, et de limiter le champ de ce qui peut être traité durant la réunion.

Delphine et Jérôme sont également amenés à se justifier sur le fait de ne pas lier le nom des motifs à leur cause mécanique, et de garder des catégories descriptives plutôt que causales, voir (**III**.2.c). Ils cherchent à « faire table rase des préjugés », comme le reconnaît Delphine. Pour démontrer le bien-fondé de cette approche, Jérôme et Delphine demandent aux responsables d'atelier les types de spirales qui peuvent sortir de leurs ateliers en cas de défaut de positionnement des machines. Leurs réponses font ressortir tout l'intérêt de la démarche. Historiquement, les machines de l'atelier Photolithographie tournent dans un sens différent de celles de l'atelier Nettoyage, et produisent donc des spirales dans des sens opposés : cela permettrait de discriminer l'origine d'un problème par l'examen du sens de n'importe que motif spirale. Néanmoins, l'atelier Nettoyage s'est récemment doté de nouvelles machines qui peuvent tourner dans les deux sens, il devient donc difficile de trouver la cause originelle d'une spirale en examinant seulement sa courbure. L'approche causale apparaît ici moins robuste face aux évolutions techniques potentielles de l'organisation.

Difficile de définir, définition difficile

Cela étant posé, la suggestion proposée par Jérôme en début de réunion est la seule qui soit assise sur une objectivation du problème au travers de l'opposition entre « gauche – concave » et « droite –

convexe ». Il n'y a pas d'opposition franche : c'est la vision des bureaux qui est adoptée. Elle ne produit cependant pas grand enthousiasme, car elle continue de poser problème. L'un des responsables d'atelier l'explicite : « Je suis d'accord Jérôme, c'est concave mais c'est pas le vocabulaire qu'on utilise aujourd'hui. » Jérôme essaye d'esquisser des définitions courtes, en direct, mais celles-ci apparaissent trop compliquées au goût du groupe. L'heure passe et le consensus n'est pas obtenu, l'objectif initial de la réunion n'est pas atteint. Jérôme et Delphine proposent d'élaborer ensemble, et plus tard, une solution qui sera soumise ultérieurement aux autres participants.

La simplicité apparente d'une forme comme la spirale conduit à élaborer des définitions qui se révèlent complexes, au sens où elles introduisent des concepts mathématiques plus alambiqués. En sortant de la réunion, Delphine me glisse d'ailleurs : « La plupart [des opérateurs et des techniciens] ont pas le bac, alors parler de concave… ». Le sous-entendu – que je n'ai pas alors l'audace de faire expliciter – témoigne à notre sens d'une volonté de simplification du travail des techniciens, en leur fournissant des informations claires et simples. Malgré tout, et notamment dans le cas des techniciens qualité que nous avons suivis, le travail est déjà d'une importante sophistication. Il est facile d'imaginer que des explications appuyées soient suffisantes à faire intégrer la définition choisie, pour peu que ces explications soient réellement dispensées.

Vers des définitions explicites : devenir le définisseur

C'est ici que bien malgré moi, j'entre en scène. Alors que nous débriefons la réunion la semaine suivante, Jérôme me demande un service : il voudrait que je planche sur une définition des spirales. La demande m'affole d'abord, car j'ai le sentiment qu'elle perce la fine membrane qui fait de moi un observateur (identifié et situé, certes) pour me transformer en acteur du projet. Je crains de « polluer le terrain » (Gilbert et Raulet-Croset 2023:34). A ce moment de l'étude, j'ai déjà eu l'occasion de contribuer au projet en aidant à nettoyer le *dataset* (**III.**3.a). En obtempérant, j'avais alors eu le sentiment d'apporter un soutien à mes enquêtés, en restant un simple exécutant de leurs demandes. Ces expériences m'avaient permis de me glisser, sur le plan cognitif, dans un état d'esprit que je pouvais estimer assez proche de celui de Claude ou de Jérôme, qui réalisent d'habitude cette tâche. L'enjeu me paraît alors différent puisque je suis amené, dans le cas des spirales, à élaborer une réflexion qui pourra avoir des effets concrets sur les formes de catégorisation. Malgré tout, plusieurs arguments me convainquent de l'intérêt de contribuer au travail de définition[294] :

- Sur le plan méthodologique, ce qui touche à ma seule contribution (motivations, justifications) ne doit pas être traité comme un contenu empirique, mais seulement comme une mise en contexte d'observations ultérieures, qui, elles, pourront contribuer à l'analyse.
- La proposition qui m'est faite est l'occasion d'une introduction originale d'une dimension expérimentale dans la méthode sociologique. Dans un cadre certes circonscrit, je suis à même d'observer la réception de propositions spécifiques.
- Je dispose à ce stade de suffisamment d'éléments empiriques pour rendre compte du processus de catégorisation avant que je ne sois convié à y participer formellement.

[294] Ces arguments ont été pensés *a posteriori* même si j'ai pu, sur le moment, avoir l'intuition qu'une telle contribution de ma part était légitime. Je me suis senti obligé d'accepter, sans quoi ma relation avec les enquêtés aurait pu être compromise.

Je me lance donc. Proposer une nouvelle définition des spirales s'avère finalement une tâche assez stimulante, qui me prend une petite demi-heure. Cette sensation d'aisance dans l'exercice ne tient pas à des aptitudes personnelles particulières, loin de là : elle est plutôt le fruit d'une réflexion qui a émergé dès la réunion des spirales. Il m'y était rapidement apparu que la difficulté dans la définition des spirales tenait à leur caractère visuel, difficile à décrire, dans la pleine lignée des savoirs tacites (Polanyi 1967). Une spirale est plus facile à reconnaître à l'œil qu'à définir.

C'est compte tenu de ces réalisations somme toute classiques pour un sociologue des organisations que je propose une définition. Elle s'écrit comme suit :

« On regarde la moitié haute de la plaque. On place sa main gauche à plat, paume vers la plaque, doigts joints sauf le pouce. Si les motifs de la spirale épousent la forme faite par le pouce et l'index, il s'agit d'une spirale gauche. Dans le cas contraire, c'est une spirale droite. »

Il ne s'agit plus d'une classe descriptive ou causale (**III.**2.c), mais plutôt d'une catégorie incarnée, corporelle, qui demande une implication particulière de celui qui en prend connaissance, et de celui qui l'explique. Elle ne vise pas tant à être lue qu'à être montrée, voir (Figure 57). Débarrassée de sa mathématicité, la définition vise à transcrire physiologiquement, et intuitivement, les notions abstraites de concavité et de convexité. Notons qu'elle n'a cependant pas une vocation universelle, au sens où elle suppose que chacun dispose d'une main gauche à même d'effectuer l'exercice et de donner un résultat probant. Je suis naturellement curieux de la réception qui sera faite à cette définition qui adopte des modalités d'énonciation bien différentes des autres. Reprenons à présent notre analyse.

Lorsque je présente la définition à Jérôme, celui-ci se montre satisfait. Elle lui paraît intelligible. C'est probablement l'impasse entrevue lors de la réunion des spirales qui le conduit à accepter cette voie divergente. Malgré l'inadéquation de la définition avec les critères habituels de catégorisation du *dataset*, la classification établie par Jérôme reste souple, car elle s'appuie ultimement sur des critères de praticité et de performance du ClassifiMotif. Il choisit de garder la suggestion.

Quelques semaines plus tard, il organise une autre réunion avec les responsables d'équipe des techniciens qualité en salle, dans le but de leur présenter le ClassifiMotif. Cette réunion est également l'occasion de justifier la nécessité de l'arrêt de certaines machines d'inspection dans les semaines à venir. Ces arrêts provisoires et courts permettent d'installer le logiciel qui supporte le ClassifiMotif, mais doivent impérativement être réalisés sur des machines qui ne sont pas en cours de prise d'images. Ils peuvent constituer un handicap pour les techniciens de la salle blanche, car un nombre restreint de machines équivaut à une plus faible capacité d'accueil de l'atelier du service Qualité, et donc à une « baignoire » de plus faible volume, plus facile à faire déborder.

Au moment de parcourir l'herbier des motifs qui doit être mis à disposition des techniciens, Jérôme expérimente la définition des spirales auprès des managers d'équipe en salle. A la lecture, l'un des responsables souffle un audible « oulala[295] » désabusé. Jérôme explique alors, à l'aide de ses propres mains, la façon de distinguer les spirales, et son exposé suscite finalement l'approbation. « C'est pas bête », dit l'un des participants de la réunion. La définition incarnée, dont l'apprentissage porte une nature

[295] Propos recueillis lors d'une réunion de travail en février 2023.

relationnelle, trouve un écho favorable. Ce n'était pas gagné. Cette petite expérience innocente montre tout de même la capacité des managers de proximité des ateliers qualité à concevoir d'autres modalités de transmission du savoir que textuelles et exactes.

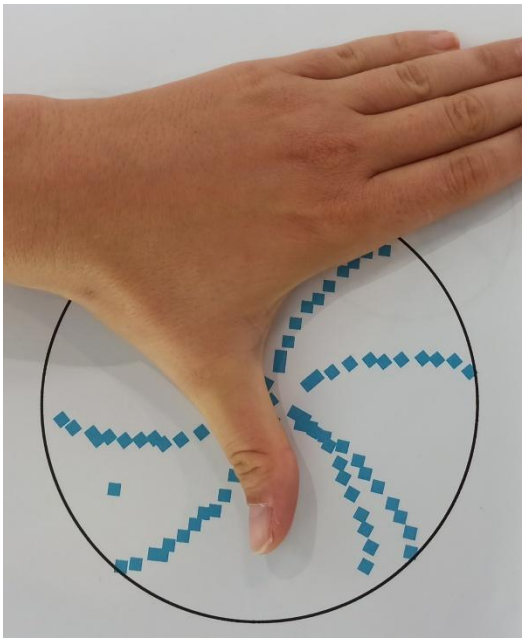


Figure 57 : Le creux de la main gauche épouse un bras de spirale sur le volet supérieur de la plaque : selon la définition que nous avons proposée, c'est donc une spirale gauche. Nous remercions vivement Anne-Gaëlle Guérin et Suzanne Guillou pour leur assistance technique dans la réalisation de ce cliché.

Ce que disent les spirales (épilogue)

Un an plus tard, le jour de la synthèse que j'effectue auprès de l'équipe IA, Jérôme me renseigne sur la suite de la saga des spirales. Il me révèle s'être rendu compte que le logiciel d'analyse d'images procédait systématiquement à un retournement (en miroir) des images. Autrement dit, quelle que soit l'idée que l'on puisse faire de ce qui est une « spirale gauche » ou une « spirale droite », les « spirales gauche » apparaissent, quoi qu'il arrive, comme des « spirales droite » pour le logiciel, et inversement. Cela nous fait bien rire.

A l'usage, Jérôme s'est en outre aperçu que les performances de classification étaient meilleures avec une seule catégorie « spirale », plutôt qu'avec deux. Il a donc procédé à une fusion pure et simple des catégories. Les « spirales gauche » et « spirales droite » ne sont plus, il n'y a plus que des « spirales » tout court. Adieu, ma définition incarnée.

Evoquer la réunion des spirales permet de rendre compte d'une situation emblématique de la somme des enjeux au cœur de la conception des systèmes d'IA dans le contexte industriel. Elle convoque des diversités de représentations, un processus de catégorisation, la recherche d'un standard consensuel mais aussi transférable. Le parcours définitionnel que nous avons décrit révèle le travail de longue haleine que peut susciter le processus de catégorisation. Comme on le voit, son résultat est négocié par les acteurs, situés dans des contextes spatio-organisationnels différents les uns des autres. La définition des spirales est contextualisée, transformée selon des priorités qui évoluent. La « transformation des savoirs » décrite par A. Hatchuel et B. Weil (1992) prend ici la forme d'un processus continu, sujet à débat, jamais vraiment terminé.

La réunion des spirales est aussi l'occasion d'une véritable réflexion collective mettant en jeu des perspectives qui n'ont pas souvent l'opportunité de se rencontrer – du moins sur ces thématiques. Même si ses résultats n'ont pas abouti à une définition claire, il nous semble qu'elle n'est pas un moment organisationnel vain. D'une certaine façon, le déploiement du ClassifiMotif, et les débats qui lui sont associés, participent à réintroduire une forme de réflexivité dans le travail, sur la façon dont il est conduit. Cette réflexivité apparaît comme une conséquence inattendue du déploiement l'IA, un sous-produit de l'exigence de performance du système qui n'est pas inhérent à son développement. Elle pourrait, bien sûr, émerger par d'autres procédés organisationnels.

Conclusion (III.3)

La constitution des bases de données d'entraînement des systèmes d'IA amène à une multiplicité de situations qui peuvent paraître inattendues. Tantôt activité solitaire, tantôt discussion collective, elle repose sur la circulation des savoirs entre les différentes parties de l'organisation. Cette transmission est intéressée par le bon déploiement du ClassifiMotif, et son intégration dans l'organisation du service Qualité. Ce n'est qu'à cette condition que la qualité du travail réalisé s'en trouverait augmentée.

Ces processus de conception, au risque de se répéter, s'inscrivent sur le temps long, à deux titres. D'une part, le parcours de vie du système est émaillé de nombreux allers et retours catégoriels, lors desquels les concepteurs reviennent sur le contenu de ces catégories. La base de données est améliorée de façon continue, et de nouvelles « compétences numériques » (*digital skills*) sont intégrées par les ingénieurs (Behrend et al. 2022), essentiellement par la pratique. Savoir gérer une base de données, savoir annoter, établir un espace sémantique de catégories : voilà des exemples de ces nouvelles capacités à maîtriser, et mettre en œuvre. Par ailleurs, l'annotation ou le peuplement sont en eux-mêmes des tâches fastidieuses, répétitives, qui réintroduisent, d'une certaine façon, des mécanismes de travail à la chaîne au sein d'emplois qualifiés. Certaines de ces tâches, comme l'annotation, sont justement les mêmes que celles qui souhaitent être éliminées en salle blanche, et qui resurgissent dans les bureaux, à volume plus faible. L'introduction de l'IA contribue en ce sens à poursuivre des dynamiques de « tâcheronnisation » déjà identifiées chez les développeurs informatiques (Casilli 2019:301) et qui, dans la structuration des tâches, s'étendent à d'autres corps de métier.

Lors de ce processus de conception, il est apparu étonnant de constater que le savoir informel des techniciens en salle blanche n'était pas valorisé. Pourrait-on aller jusqu'à dire qu'il est méprisé ? Ce n'est en tout cas pas les techniciens que le système doit satisfaire, tant qu'il convient au service Qualité dans sa globalité. Leur absence amène les concepteurs à projeter leurs propres visions de ce qui constitue le réel, un élément qu'a déjà noté T. Gamkrelidze (2022:54). Les savoirs existants sont ainsi considérés comme un obstacle plutôt qu'une base pour la conception du système. La construction du dispositif s'accompagne d'une construction de nouveaux savoirs, qui répondent à des objectifs organisationnels situés, potentiellement décalés de leur contexte d'usage.

En dépit de cette absence notable, les discussions entourant le système d'IA sont l'occasion de faire contribuer des points de vue organisationnels variés. Ces échanges participent, il nous semble, à déployer une forme de réflexivité en permettant aux travailleurs de communiquer sur la façon dont ils perçoivent leur travail. Cette réflexivité est encore limitée, peu inclusive, mais porte malgré tout en elle un embryon de la transversalité et de la participation promises par l'*Industrie 4.0* (Vereycken et al. 2021). Il est entendu que cette conséquence inattendue du travail de déploiement de l'IA reste à une échelle faible et que d'autres modes de participation seraient sans doute bien plus efficaces à permettre une véritable réflexion collective.

Nous sommes pour l'instant restés évasifs sur la façon dont est évalué le système, alors même que ses performances sont un enjeu tout à fait central pour l'équipe IA. La construction des indicateurs d'efficacité du ClassifiMotif sera justement l'objet de la section suivante. Nous verrons que c'est justement cette recherche de performance qui domine le travail épistémique que nous avons décrit dans ce chapitre.

4. Evaluer et améliorer les systèmes d'IA : entre performance technique et contraintes organisationnelles

L'engouement autour des « systèmes-experts » (Cardon et al. 2018) s'est inscrit dans une attente technique : récupérer des savoirs complexes pour les dupliquer dans des machines. Nous l'avons vu dans ce chapitre : sur le plan technique (apprentissage à partir d'exemples) et sur le plan de leur conception (située, négociée, collective), les systèmes des années 2020 ne remplissent toujours pas l'objectif. Il n'empêche : ces systèmes donnent des résultats, et servent à orienter l'action. Parfois, ces résultats sont conformes aux attentes de leurs utilisateurs, et parfois pas. A plusieurs reprises, nous avons laissé entendre que certains choix de conception du ClassifiMotif découlaient de critères de performance du système. Dans cette section, nous approfondirons largement la question en nous interrogeant sur les modalités d'évaluation de ce système.

Un « travail normatif » d'évaluation

En sociologie des techniques, N. Dodier et J. Barbot (2016) abordent l'évaluation des dispositifs techniques sous l'angle du « travail normatif » réalisé à leur égard. Il est élaboré à partir d'un « répertoire normatif » qui « regroup[e] l'ensemble des attentes normatives auxquelles se réfèrent les acteurs dans leurs évaluations, positives ou négatives, autour d'un dispositif, ainsi que les schémas de jugement que ces acteurs produisent en relation avec ces attentes. » (Dodier et Barbot 2016:434). Les promesses technoscientifiques, constituent, à ce titre, une façon de modeler les attentes des futurs utilisateurs. Nous avons déjà examiné la promesse d'efficacité de l'IA (**I.**2.a, **I.**2.b) et retrouvé sa trace dans le contexte industriel de SemiCorp (**II.**2.b). Cet imaginaire technique riche pèse sur les réflexions technologiques au sein des organisations industrielles, mais ne permet pas de les déterminer. Du point de vue des professionnels, les métaphores organiques de l'IA constituent un « obstacle épistémologique » au sens de G. Bachelard (1938). Comme nous l'avons vu à Mecanex, une partie du récit science-fictionnel est largement remis en cause par les managers de l'industrie, qui y voient une distraction dans la bonne réalisation de projets concrets, pour lesquels des preuves de bon fonctionnement sont toujours nécessaires (**II.**3.c).

Les promesses ne sont pas les seuls facteurs d'évaluation *a priori*. Pour dépasser ces perceptions déracinées, les dispositifs techniques sont mis à l'épreuve par les organisations qui cherchent à mesurer leur performance. Depuis le XXème siècle, les logiques de la gestion scientifique de la production héritées de Frederick Taylor ont érigé l'efficacité en maître-mot (Le Texier 2016:22). Même si les moyens de la mettre en œuvre ont changé, ce principe n'a pas été remis en cause à l'échelle mondiale (Le Texier 2016:23). Dans le monde industriel d'aujourd'hui, habitué à introduire de nouvelles technologies pour rationaliser les processus productifs, les contraintes spatiales, organisationnelles et techniques ont été assimilées et limitent le champ de ce qu'il est possible de faire avec une technologie donnée. Différents mécanismes sont alors mis en place pour évaluer les systèmes techniques et leur intégration dans l'organisation.

Performance technique et performance des organisations

L'évaluation de la performance peut s'opérer à plusieurs échelles, et selon plusieurs prismes. En sociologie des organisations, comme en sciences de gestion, la question de la performance est étroitement liée à celles des organisations en général. A. Bourguignon (1997) donne trois acceptions du terme « performance » : elle peut être aussi bien un jugement de valeur portant sur un succès (tel dispositif, telle organisation est performante), une action (une *performance télévisée* par exemple), ou un résultat (selon une évaluation postérieure à une action). C'est sur ce dernier sens, et sur sa quantification, que nous concentrerons notre analyse. La performance ne peut être que relative à un point de vue situé de l'organisation. Dans l'industrie, de nombreux indicateurs sont ainsi déclinables : performance technologique, financière, mais aussi sociale, environnementale (Gentil et Merle 2021).

Dans le cas de dispositifs d'IA dans le secteur hospitalier, L. Echajari et ses collègues (2024) distinguent plusieurs types de performance. La performance technique (qualifiée de « performance opérationnelle ») renvoie au taux d'erreur de systèmes de classification ou de prises de décision. Elle est le plus souvent évaluée à partir de métriques adaptées. Il s'agit de quantifier la correction d'un tel système indépendamment de son contexte d'usage. La performance économique, quant à elle, est estimée sur la base de gains pour l'organisation en termes de temps, de productivité, ou de qualité du travail. Ce ne sont pas les mêmes indicateurs qui permettent, dans chaque cas de figure, d'évaluer l'intérêt du système. Nous verrons dans cette section que, de façon contre-intuitive, la performance technique peut être affaiblie sciemment par des contraintes organisationnelles, et notamment budgétaires.

L'enjeu de la fiabilité

Le travail d'évaluation des systèmes d'IA vise, en les éprouvant, à les rendre plus robuste, plus fiables. Si les termes de fiabilité, performance, efficacité peuvent évoquer des dynamiques d'optimisation similaires, elles doivent malgré tout être distinguées. Pour K. Weick et K. Roberts (1993), des objectifs de fiabilité et d'efficacité induisent des dynamiques organisationnelles bien différentes, dans lesquelles l'attention collective n'est pas portée sur les mêmes enjeux. La fiabilité porte une dimension relationnelle : un dispositif n'est pas fiable en soi, il est considéré fiable par un utilisateur, qui s'y fie. Dans le champ de l'IA, toute une littérature se développe ainsi autour du concept de dispositifs « dignes de confiance » (*trustworthy AI*) (Li et al. 2023). Paradoxalement, celle-ci met au second plan l'interaction humain-machine, en négligeant complètement l'expérience de l'utilisateur. La confiance en ces systèmes est essentiellement envisagée sous l'angle de métriques à satisfaire, et il en va de même pour l'équité ou la transparence, transformées en des problèmes techno-solubles. C'est un cas typique où la fiabilité est effectivement reléguée à une fonction d'efficacité. O. Freiman (2023) soupçonne ainsi que l'étiquetage de systèmes « dignes de confiance » conduirait à attribuer des responsabilités inadéquates à ces systèmes qui, en produisant des erreurs, failliraient à cette confiance. Son argument pourrait être prolongé en envisageant qu'un système « digne de confiance » ne pourrait se tromper, de sorte que la responsabilité de conséquences néfastes serait déplacée vers les utilisateurs.

La production de la fiabilité se construit sur le long-terme d'une conception qui se double d'une utilisation pratique. Pour vérifier les performances du système, il est mobilisé sur des cas réels. La tâche s'avère d'autant plus périlleuse lorsque, comme on l'a vu dans le cas du CatégoDéfo, des premiers usages

fournissent des résultats erronés qui disqualifient d'entrée de jeu le dispositif aux yeux des techniciens-utilisateurs (**II.**2.b). L'obtention de cette fiabilité passe par une amélioration du système, qui peut être redoutée par la prévision d'une substitution ultérieure de l'appreneur humain par l'apprenant sociotechnique. L'argument se justifie dans de nombreux cas. L'éditeur de jeux vidéo Electronic Arts a récemment fait l'objet d'une controverse suite à la dénonciation de contrats demandant aux doubleurs d'autoriser le studio à utiliser leur voix pour entraîner, en interne, des systèmes d'IA générative (Ponroy 2025). La menace perçue est-elle légitime ? Les comédiens, de leur côté, craignent que l'on ne fasse plus appel à eux dans le futur. Dans le contexte industriel, où les efforts de standardisation, d'automatisation et de numérisation se succèdent depuis des dizaines d'années, le débat s'entend un peu différemment. La mise au point d'automates conduit à la production d'erreurs nouvelles dans le flux de production, qui restent à être vérifiées et corrigées par les salariés. C'est l'une des « ironies de l'automatisation » notée par L. Bainbridge (1983) que nous avons déjà développée (**I.**2.c).

L'évaluation des systèmes d'apprentissage machine : un objet des études critiques sur l'IA

Un champ de recherche pluridisciplinaire, les études critiques de l'IA (*critical AI studies*) s'est récemment constitué au sein des STS. Il aborde la production de ces dispositifs sous les angles technique, socioculturel et historique (Raley et Rhee 2023), en analysant les effets de variables socio-économiques et politiques sur leur constitution, leur fonctionnement, et leur intégration dans le champ social. Parmi les objets d'intérêt des chercheurs du domaine figure la production de l'évaluation des systèmes apprenants (Luitse et Schjøtt Hansen 2025). L'un des postulats est de considérer que l'évaluation de ces modèles est un « système à la structure arbitraire » (Hutchinson et al. 2022:3) et la recherche porte justement sur les choix qui guident l'établissement de modes d'évaluation. Deux grands types d'évaluation sont recensés selon les applications projetées des systèmes (Hutchinson et al. 2022).

Dans le premier cas, les évaluations peuvent avoir une visée scientifique, en vérifiant si le système est à même de fournir des explications sur le fonctionnement du monde physique ou social (*le système d'IA est-il capable de prévoir la météo qu'il fera demain ?*). L'évaluation est centrée sur le modèle en question. Pour ce faire, dans le champ scientifique, les bancs d'essai (*benchmarks*), sont structurants pour les communautés disciplinaires concernées (Denton et al. 2020). Ces bases de données servent de référence standard à partir desquelles les scientifiques peuvent comparer leurs modèles.

Deuxième possibilité : ces évaluations peuvent porter sur la capacité du modèle à être utilisé comme moyen pour une fin spécifique, selon une perspective plus ingénieure. C'est typiquement le cas du ClassifiMotif. Dans le contexte industriel, les bancs d'essai sont moins fréquents. En effet, les applications sont développées et conservées en interne, où les données constituent des ressources concurrentielles. Le plus souvent en outre, ces dispositifs concernent des problèmes bien spécifiques, qui nécessitent dès lors des bases de données sur-mesure. C'est pourquoi les membres de l'équipe IA travaillent, quasiment en solitaire, sur leurs propres *datasets*. Il ne s'agit alors plus de comparer le modèle à un autre, mais de vérifier s'il parvient bien à réaliser la tâche qui lui incombe. Cette perspective restreint le problème de l'intégration du système à un problème de performance.

B. Hutchinson et ses collègues (2022) identifient aussi un certain nombre d'hypothèses des chercheurs en sciences des données. Ces hypothèses sont relatives à l'évaluation des systèmes d'apprentissage machine[296], voir (Tableau 9). Elles renvoient dans l'ensemble aux idéaux d'objectivité mathématique aux sciences computationnelles (boyd et Crawford 2012). En ce sens, elles constituent une nouvelle trace[297] d'une diffusion des promesses décrites dans le premier chapitre (**I.**2). Nous aurons l'occasion, dans cette section, d'analyser la trajectoire de ces hypothèses dans l'équipe IA. Si elles peuvent s'y vérifier originellement, l'expérience d'essais et d'échecs permet ultimement de les dépasser. Comme le montrent G. Gaglio et A. Loute (2023) avec le cas de dispositifs d'IA déployés en radiologie, l'introduction de ces technologies se déroule sur le mode de l'expérimentation, voire de « l'expérimentation tacite » (concept qu'ils empruntent à (Ansell et Bartenberger 2018)), au sens où elle n'est considérée comme une expérimentation qu'*a posteriori*.

Hypothèse	Nom	Description
H1	*Conséquentialisme*	L'évaluation d'un modèle revient à évaluer seulement ses conséquences, et surtout ses conséquences directes – et non pas les moyens mathématiques ou matériels de la production de ces résultats, ni leurs effets plus globaux sur l'environnement qu'ils pénètrent.
H2	*Capacité d'abstraction du contexte*	Le problème traité par le système est réductible à un problème de prédiction abstrait, où l'entrée et la sortie sont identifiés et définis.
H3	*Myopie des entrées*	Les données d'entrée sont largement ignorées dans l'évaluation, qui repose uniquement sur les résultats de prédiction.
H4	*Modélisation quantitative*	Les termes du problème sont quantifiables et commensurables.
H5	*Erreurs équivalentes*	Toutes les erreurs sont équivalentes, il n'y a pas d'erreur plus grave qu'une autre.
H6	*Qualité des données de test*	Les performances sur l'ensemble de test sont représentatives des performances réelles.

Tableau 9 : Hypothèses des pratiques d'évaluation des dispositifs d'apprentissage machine, relevées par (Hutchinson et al., 2022).

Dans cette section, nous chercherons à comprendre comment l'évaluation du ClassifiMotif est construite aux différents échelons de l'organisation : celui de l'équipe IA (travaillant à son amélioration) et celui du service Qualité (qui y perçoit un avantage économique). La première partie de cette section placera la loupe sur les pratiques d'évaluation du ClassifiMotif dans l'équipe IA, en montrant qu'elle s'inscrit dans une stratégie d'acceptabilité du système, qui vise à valider ses performances, par leur objectivation (4.a). Nous examinerons ainsi la façon dont le ClassifiMotif est évalué avant de montrer comment, du point de vue des ingénieurs de l'équipe IA, la correction constitue le critère central d'évaluation. Par suite, nous verrons comment ils tâchent d'améliorer de façon continue le système, en procédant à un travail de « maintenance épistémique » (4.b). En nous plaçant du point de vue du service Qualité dans son

[296] Attention, il n s'agit pas d'hypothèses qui porteraient sur le comportement des chercheurs. Hutchinson et ses collègues énoncent plutôt les hypothèses qui gouvernent (implicitement ou non) l'évaluation des modèles.

[297] Peut-être devrions-nous plutôt parler de variante, car les promesses associées aux technologies numériques, partiellement reprises par celles de l'IA, ont largement précédé ces dernières.

ensemble, nous verrons que l'intégration du système au sein de l'organisation demande à satisfaire de nouvelles contraintes, qui peuvent amener à ne pas pleinement exploiter la performance technique du système (4.c).

4.a. Une évaluation objectivée de l'IA

85% de succès sur les plaques normales ; 90% sur les plaques avec motif ; 85% sur l'ensemble.

Voilà les seuils limite à partir desquels le ClassifiMotif peut être déployé en salle blanche, comme me l'explique Jérôme. Parvenir à ces taux de réussite est une condition *sine qua non* de la mise en production du ClassifiMotif. Sur le plan technique, l'évaluation des systèmes d'apprentissage machine repose quasiment intégralement sur leurs résultats (Boullier et El Mhamdi 2020). L'examen de ces résultats permet d'estimer la propension des systèmes à fournir des résultats souhaitables, c'est-à-dire correspondant à la réalité. L'hypothèse d'une telle correspondance à la réalité est ici relativement forte : l'ensemble de ce chapitre a montré comment les annotations, les catégories et la façon dont elles sont peuplées constituent des objets de débat et de négociation qui font de la vérité terrain une vérité située. Cette sous-section vise à expliciter les méthodes mises en place pour objectiver l'efficacité du ClassifiMotif.

Entraîner le système

Lorsque des modifications conséquentes sont réalisées sur le *dataset*, c'est-à-dire la base d'entraînement du ClassifiMotif, Claude et Jérôme procèdent au lancement d'une nouvelle version du modèle. Ils l'espèrent toujours meilleure que la précédente. La base de données est envoyée au service Informatique qui procède à l'entraînement. L'opération est d'ordre mathématique : l'hypothèse d'une capacité d'abstraction du système (H2) motive ce procédé. Tour à tour, l'ensemble des images de la base de données sont traitées par le modèle, qui commence par effectuer des prédictions au hasard. Grâce à un algorithme d'apprentissage, appelé rétropropagation du gradient[298], le réseau de neurones est progressivement ajusté aux données. Ses poids sont mis à jour de sorte à optimiser sa faculté à résoudre le problème de distinction des types de motifs.

Toute la méthode est centrée sur la quantification : les images sont converties en listes de nombres pour être fournies modèle entraîné, qui est défini par une liste de poids. Ce processus s'inscrit pleinement dans l'idée que la détection des alertes de qualité est un problème mathématisable (H4). Au bout de l'entraînement, une fois que toutes les données d'entraînement ont été soumises au modèle, la nouvelle version est prête.

Préparer l'évaluation

Pour vérifier la bonne réalisation de l'entrainement, Claude et Jérôme réalisent des tests. Ceux-ci visent à vérifier les performances du système de classification en lui soumettant un ensemble de données qui ne figurent pas dans la base de données d'entraînement.

Nous sommes en novembre 2022, et Jérôme me propose de l'assister à l'évaluation de la nouvelle version du ClassifiMotif, qu'il vient d'achever, en la comparant avec celle qui est actuellement branchée sur la

[298] L'algorithme de rétropropagation du gradient est une méthode fondamentale pour le domaine de l'apprentissage machine. Pour le dire grossièrement, le principe général est d'ajuster les paramètres d'un réseau de neurones en cours d'apprentissage par une méthode systématique, à partir de l'évaluation de leurs erreurs (Linnainmaa 1970; Rumelhart, Hinton, et Williams 1986).

production. Une question peut immédiatement se poser au lecteur attentif[299] : comment le ClassifiMotif, qui n'a pas été déployé, peut-il être connecté aux ateliers Qualité ? La réponse tient en deux mots : le « mode *shadow* ». À la suite des échecs de déploiement du CatégoDéfo sur lequel nous reviendrons, une nouvelle méthode de suivi des performances du ClassifiMotif a été adoptée. Elle consiste à lier le logiciel de gestion de la production au système d'IA, pour qu'il puisse traiter l'ensemble des plaques passant par les machines d'inspection. Cependant, le signal ne va que dans un sens : le système se contente de classer des plaques, à la manière d'une veille permanente, sans qu'il ne puisse générer d'alertes vers la production, voir (Figure 58). Ce « mode *shadow* » permet à Claude et Jérôme de venir vérifier, de manière ciblée ou au hasard, si les plaques actuellement en production présentent des motifs originaux, et si le ClassifiMotif fonctionne conformément à leurs attentes.

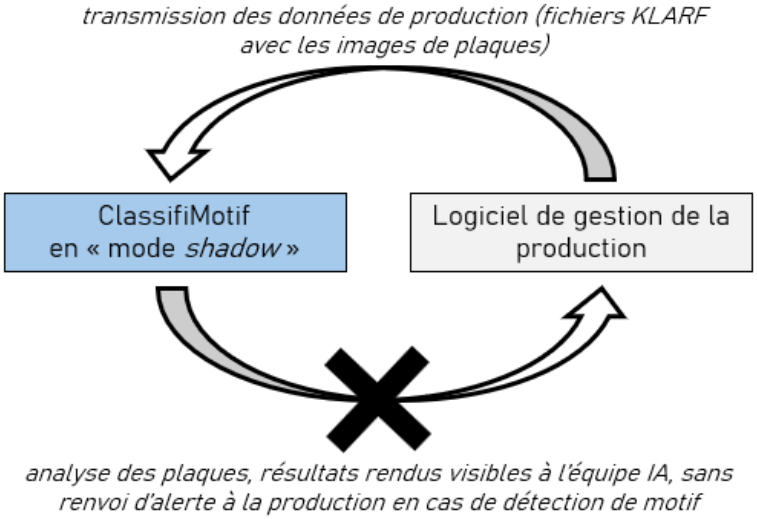


Figure 58 : Schéma explicatif du « mode *shadow* ».

La constitution de la base de données de test est un exercice périlleux : Jérôme a deux cents images de plaques à récupérer. Le nombre (200) est le compromis qu'il a trouvé entre deux contraintes : gestion du temps et quête de fiabilité. La première contrainte est celle du temps passé à trouver les bonnes plaques, récupérées à la volée, à partir du logiciel de visualisation de la production. Il doit en noter les noms pour générer les fichiers KLARF correspondant. Ces fichiers sont ensuite enregistrés dans un dossier qui finalement est analysé par le ClassifiMotif. La seconde contrainte est celle de la fiabilité de la mesure elle-même : plus l'échantillon de test est volumineux et plus l'estimation des performances du ClassifiMotif est fidèle à la réalité. Le caractère volumineux de l'ensemble de test n'est cependant pas suffisant. La base de test doit intégrer un grand nombre de motifs différents, même les plus rares, pour s'assurer que la nouvelle version du ClassifiMotif les reconnaît bien.

Cet ensemble de tâches, qui vise à préparer l'obtention des métriques de performance, constitue un travail non négligeable, et capital. Les données transitent de logiciel en logiciel, grâce à des copier-coller, des formulaires à remplir, des cases à cocher. Même si tout ce travail disparaît derrière l'obtention de

[299] Le lecteur inattentif est bien entendu pardonné.

métriques quantitatives, l'équipe IA discute volontiers et collectivement des résultats, en les remettant en contexte.

Des métriques de performance technique

Une fois le traitement effectué par le ClassifiMotif, et ses prédictions de classification obtenues, Claude et Jérôme dressent des matrices de confusion[300]. Elles permettent de rendre compte visuellement des succès et échecs du ClassifiMotif et donner à voir des résultats plus intelligibles, voir (Figure 59).



Figure 59 : Des matrices de confusion. A gauche, le cas général, et à droite, avec un exemple ad hoc d'un système de classification des pourriels (spams). Les graphiques proviennent de la page Wikipédia pour « Matrice de confusion ».

Pour parvenir à ces résultats, des métriques sont calculées selon les résultats donnés par le système. En sciences des données, il existe des dizaines de métriques différentes, permettant chacune d'évaluer les résultats selon des angles différents (Botchkarev 2019). Le choix d'une (ou plusieurs) métrique(s) particulière(s) peut reposer sur plusieurs critères : traitement particulier des faux négatif par rapport aux faux positif, erreurs sur certaines catégories jugées plus graves que d'autres (Thomas et Uminsky 2022).

La métrique la plus simple à imaginer est la précision (ou *accuracy*) : on calcule simplement le taux de vrais positifs, en divisant le nombre d'essais effectués par les résultats corrects. En pratique, cette métrique n'est quasiment jamais utilisée, car elle ne donne pas d'informations réellement opérantes[301]. Pour le ClassifiMotif, la métrique utilisée est le F1-score. Pour obtenir cette mesure, l'équipe calcule la moyenne (géométrique) de deux métriques classiques : la précision, que nous venons d'évoquer, et le rappel (*recall*). Le rappel permet de déterminer le taux de détection des positifs du modèle. Pour mieux comprendre de quoi il retourne, voir (Figure 60).

Le F1-score, comme la majorité des métriques de performance de classification, présuppose une quasi-équivalence des erreurs (H5). Il ne les prend en compte que numériquement, en les comptant, sans

[300] Habituellement en apprentissage machine, les ingénieurs procèdent à une sélection du modèle en faisant varier ses hyperparamètres (par exemple pour un réseau de neurones : le nombre de couches, le nombre de neurones par couches, les coefficients régissant l'ajustement des poids des neurones). Pour le ClassifiMotif, ce processus a été effectué en début de projet et sous-traité. Ainsi, ces hyperparamètres sont fixés : la seule différence entre les versions du ClassifiMotif tient aux bases de données utilisées pour les entraîner.

[301] Imaginons un test de dépistage d'une maladie très rare. Ce test aura une précision proche de 100% s'il prédit systématiquement que le patient dépisté n'est pas malade (que celui-ci le soit réellement ou non). La précision n'est pas pertinente dans ce genre de cas.

permettre de mettre en évidence les configurations qui génèrent ou non des erreurs[302]. C'est en allant visualiser au cas par cas ces dernières, comme nous le verrons dans la sous-section suivante, que l'équipe IA peut apprécier le comportement spécifique du modèle.

Pourquoi choisir le F1-score ? Les échanges sont réguliers à ce sujet, et notamment avec les équipes des autres sites. Ils font apparaître une forme d'arbitrarité : la métrique a été recommandée par certains ingénieurs, car elle serait la plus robuste dans le contexte de la défectivité industrielle. Elle n'est pas nécessairement mise en comparaison avec d'autres métriques, ou des moyens d'évaluation plus qualitatifs, bien que ceux-ci, nous le verrons, apparaissent de manière informelle.

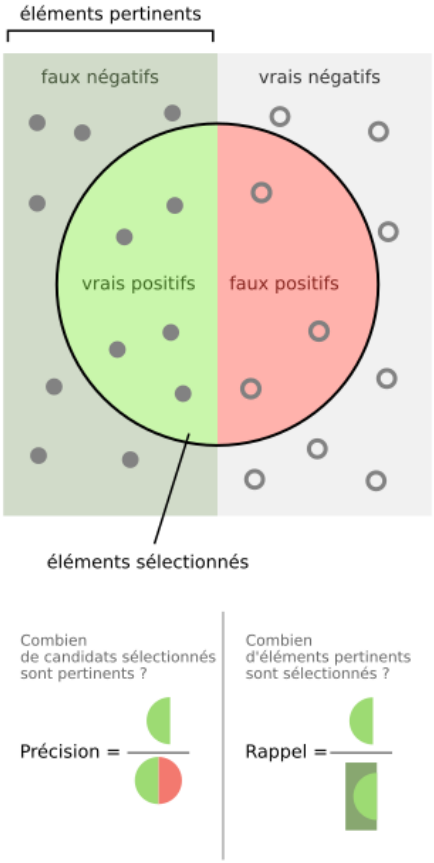


Figure 60 : Illustration graphique de la précision et du rappel. Le F1-score est calculé en faisant la moyenne géométrique de ces deux nombres. L'illustration ne représente que le cas binaire (deux classes), il existe différentes méthodes pour traiter le cas multi-classes. (c) Wikimedia Commons.

Le prisme de la correction : une obsession quantitative

Les performances de classification obtenues constituent le critère objectif primordial de déploiement du ClassifiMotif, du point de vue de ses responsables. Les résultats doivent impérativement être corrects.

[302] La prise en considération des erreurs algorithmiques, et l'équilibre à trouver entre détection des vrais positifs et mise à l'écart des faux négatifs, constitue un enjeu éthique discret mais majeur (Kraemer, van Overveld, et Peterson 2011). Pour le diagnostic d'une maladie grave, il apparaît pertinent de privilégier un test qui ferait beaucoup d'erreurs, tant qu'il parvient à détecter tous les malades. De la même façon, l'organisation du travail du service Qualité peut être affectée par des choix stratégiques – (a) *tout détecter quitte à en avoir trop* vs (b) *ne détecter que ce qui est certain quitte à laisser passer des cas problématiques* – qui n'apparaissent qu'implicitement dans le choix des métriques.

Notre constat confirme (au moins partiellement) la prédominance des logiques conséquentialistes (H1) et de myopie des entrées (H3) dans l'équipe IA. Comme l'a noté J.-S. Vayre (2018:90) à propos des systèmes de prédiction : « [les] critères [que la machine doit maximiser] sont souvent en lien étroit avec les indicateurs de mesure de performance qui sont propres à la culture gestionnaire de l'entreprise qui souhaite mobiliser la machine. » Le service Qualité est chargé de repérer les problèmes qualité et de les résoudre, et l'objectif du ClassifiMotif s'aligne parfaitement avec ce principe.

Sur les murs du service, des posters présentent différents projets réalisés dans les mois ou annoncées précédents. Il est marquant d'y observer la prévalence d'indicateurs chiffrés comme présentant des preuves de succès. Cette situation n'est pas toujours bien vécue. Etienne, qui s'occupe désormais du CatégoDéfo, se plaint lors d'une réunion hebdomadaire de l'équipe IA : « Y'a jamais de moment où on a des messages du top management comme quoi on a fait du bon boulot. On nous dit "vous avez fait tant" et c'est tout. […] Aujourd'hui on a l'impression que la qualité, c'est moins important que la prod[303]. »

Au moment de l'étude, le travail de Jérôme est tout entier orienté vers la maximisation des métriques quantitatives évaluant le ClassifiMotif. Les versions se succèdent, avec des améliorations plus ou moins probantes des performances. Chaque dévoilement des résultats d'un nouveau modèle est un moment attendu et redouté par l'équipe IA. Il fait suite à plusieurs semaines voire mois de travail sur la base de données. Les améliorations sont l'occasion d'un grand enthousiasme, là où les stagnations sont particulièrement frustrantes pour l'équipe. La version 8 se révèle à ce titre décevante, voir (Tableau 10) :

F1-Score	**Plaques normales**	**Plaques avec motif**	**Ensemble**
Version précédente	0,74	0,66	0,67
Nouvelle version (n°8)	0,75	0,68	0,69
Cible	**0,85**	**0,90**	**0,85**

Tableau 10 : Performances mesurées et espérées du ClassifiMotif, évaluation de décembre 2022.

Certes, les résultats sont un peu meilleurs, mais malgré le travail acharné de Jérôme, ils n'augmentent qu'à la marge. Le problème est immédiatement imputé au *dataset* : si le système n'est pas capable de classifier les motifs, c'est qu'il ne dispose pas des données qui lui permettent de le faire. Claude explique ainsi : « La performance elle est pas seulement due à la qualité du réseau neuronal, mais aussi à celle du *dataset*[304]. »

Le bilan obtenu au cours de cette évaluation augure dès lors de nouvelles salves d'annotation, de revue de la base de données. En effet, la dimension prédictive du travail d'évaluation des systèmes d'IA porte une charge performative (Mackenzie, 2015). L'un des leviers d'amélioration des performances du système est alors de procéder à une restructuration du système de catégorisation, en modifiant les catégories qui génèrent le plus d'erreurs. En pratique, c'est à cette période que Jérôme relance, avec Delphine, la transformation du système de classification du ClassifiMotif, qui donnera notamment lieu à la réunion des spirales (**III.**3.b). L'angle choisi pour améliorer le dispositif est aussi le résultat de contingences organisationnelles qui restreignent les possibilités d'action, comme le rappelle Jérôme :

[303] Propos recueillis lors d'une réunion en septembre 2022.

[304] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juin 2022.

« J'ai pas beaucoup de leviers […]. Le truc c'est que tu sais pas combien il faut mettre [d'échantillons dans le *dataset*], et lesquels […]. Et puis il faut repasser par toutes les boucles d'implémentation[305]. »

Les motifs indéfinis : laisser le ClassifiMotif suspendre son jugement

Une autre métrique est prise au sérieux par l'équipe IA : le taux de motifs indéfinis. Une méthode ingénieuse a en effet été élaborée pour éviter les anomalies techniques inhérentes au caractère probabiliste des systèmes de classification, dont des entrées proches peuvent donner des résultats radicalement différents. Cette méthode est celle des votes. En réalité, le ClassifiMotif n'est pas un seul réseau de neurones isolé, il agrège les résultats de huit modèles distincts (mais basés sur un même algorithme) auxquels sont systématiquement soumis les images de plaques. Chaque modèle reçoit la même image de plaque avec un certain degré de rotation[306]. Après traitement, le résultat d'un des huit modèles est considéré comme un vote, voir (Figure 61). Si les huit modèles sont d'accord, alors le résultat donné sera celui du ClassifiMotif, visible à l'utilisateur.

Parfois, cependant, les résultats divergent. Comment trancher ? Au moment de notre étude, l'équipe IA expérimente différents seuils d'accord à partir desquels le ClassifiMotif adopte le résultat de la majorité des modèles-votants : 5/8, 6/8, 7/8. Ces arbitrages, difficiles à estimer *a priori*, font l'objet d'expérimentations et d'adaptations. Il est en effet possible, pour les machines et les étapes de fabrication souhaitées, d'ajuster ces seuils. Le déploiement du ClassifiMotif demande ainsi de micro-ajustements à la marge pour l'adapter au mieux.

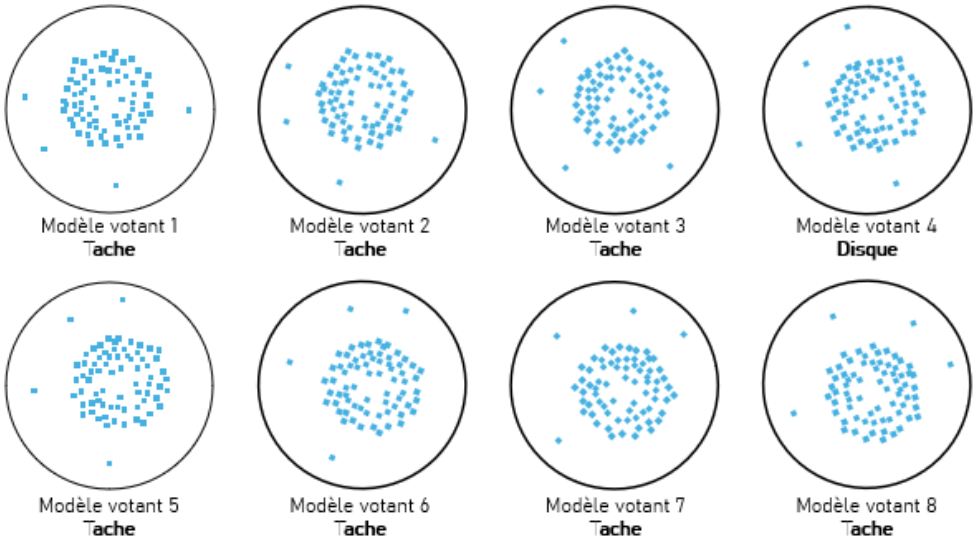


Figure 61 : Exemple de traitement par les huit modèles votants. Sept modèles sur huit indiquent « tache ». Si le seuil de définition est inférieur ou égal à 7/8, alors le ClassifiMotif indiquera qu'une tache est présente. S'il est fixé à 8/8, en revanche, il indiquera que le résultat est « motif indéfini ».

Lorsque ces seuils ne sont pas atteints, et que les votes des différents sous-modèles sont trop disparates, le résultat du ClassifiMotif est alors « motif indéfini »[307]. Il s'agit d'une catégorie « résiduelle » telle que G.

[305] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en mars 2023.

[306] Le k[ème] modèle reçoit l'image tournée d'un angle de $k\frac{\pi}{4}$ radians, $k.45$ degrés.

[307] Si la majorité des votes sont pour un non-motif « normal », c'est un « motif indéfini normal ». Dans le cas contraire, c'est un « motif indéfini anormal ».

Bowker et S. Star (2000:149) en ont fait la description. Ces catégories « poubelle » servent en un sens à permettre de donner une information utile malgré la subsistance d'une incertitude. Pour autant, l'échelle de fiabilité construite reste assez artificielle. Elle ne suit pas une règle de linéarité, au sens où les huit modèles pourraient se tromper pour la même raison. En pratique, elle sert à filtrer des erreurs ponctuelles inhérentes à la nature stochastique de l'apprentissage machine, ou à signaler des plaques portant des motifs particuliers (qui conduiraient supposément des classifications divergentes pour chaque vote).

Ce qui est particulièrement intéressant ici, c'est que ce taux d'incertitude est lui-même mesuré et constitue, en soi, une métrique de fiabilité supplémentaire. Jérôme cherche en effet à réduire au maximum le nombre de motifs indéfinis. Il ne s'agit plus de performance mais bien de fiabilité, puisque la métrique vise à rendre compte du degré de certitude des résultats du système, et donc de la confiance portée dans ses résultats Un ClassifiMotif fiable est alors un ClassifiMotif qui produit des résultats les plus certains à partir d'une échelle *ad hoc*.

Fiabiliser le système pour le faire accepter

Pourquoi un tel intérêt pour les performances du ClassifiMotif ? L'attrait pour la performance et la fiabilisation du système constitue à notre sens le troisième pilier de la stratégie d'adhésion du ClassifiMotif déployée par l'équipe IA, après la mobilisation des promesses (acceptabilité) et la constitution d'alliances (acceptation des équipes, hors techniciens). Elle prend ici la forme de l'acceptabilité plutôt que de l'acceptation.

L'équipe IA a connu des déboires avec le précédent système, le CatégoDéfo, aujourd'hui largement déployé (**II.**2.b). A l'origine, le CatégoDéfo n'était pas suffisamment performant : c'est en tous cas la leçon qui a été retenue alors que les techniciens avaient déploré ses erreurs systématiques. Cette situation « d'apprentissage organisationnel » (Kœnig 1994), perçu par la suite comme une « expérience tacite » (Gaglio et Loute 2023), a orienté la stratégie de conception vers l'optimisation du système, en tâchant de la pousser à son paroxysme. La crainte d'une non-appropriation du ClassifiMotif par les techniciens en salle blanche y est motrice. Les membres de l'équipe IA (Régis et Jérôme en tête) font régulièrement référence aux problèmes que pourrait causer le déploiement d'un système pas suffisamment performant. « Si on se trompe dans le motif, en salle ils vont nous renvoyer dans les 22[308], comme on dit. Ok on détecte, mais ils vont nous dire "Ok les cocos c'est pas le bon [motif][309]". »

Deux principes implicites de l'évaluation du ClassifiMotif ont été bousculés au cours de cette expérience. L'hypothèse de qualité des données de test (H6) a d'abord été mise en défaut puisque l'expérience a montré que l'élaboration des données en laboratoire ne suffisaient pas à assurer un entraînement efficace du système. L'utilisation à ce stade du « mode *shadow* » montre une volonté de s'assurer de l'adéquation du ClassifiMotif avec l'environnement d'usage réel. Dans ces pratiques, le principe de conséquentialisme (H1) est lui aussi légèrement remis en question, au sens où l'adhésion des techniciens est devenue un enjeu central de la conception du système.

[308] L'expression vient du rugby, elle signifie ici quelque chose comme « ils vous nous envoyer paître », « ils vous nous critiquer pour ça ».

[309] Propos recueillis lors d'une réunion en septembre 2022.

Déresponsabiliser l'équipe IA

Derrière ces pratiques, se dissimule l'idée qu'en cas d'échec, l'équipe IA ne pourrait être blâmée, car le système aurait été complètement perfectionné sur le plan technique. Ce sont alors les techniciens, ou l'organisation plus largement, qui devraient être mise en cause. Il n'est bien entendu pas question de tricher : *in fine*, ce sont les performances de correction en production qui compteront. Mieux vaut ralentir le projet en ne déployant pas le modèle que mettre en place un système qui ne fonctionnerait pas. En perfectionnant le ClassifiMotif, l'équipe IA estime qu'elle remplit sa part du travail. Le succès est réduit à la satisfaction de métriques objectives.

La situation pourrait paraître paradoxale : à la suite d'un constat d'échec lors du déploiement du CatégoDéfo, entrepris sans les futurs utilisateurs, l'on pourrait s'attendre à ce qu'ils soient plus impliqués dans le développement de systèmes futurs. Le ClassifiMotif fait effectivement l'objet de discussion avec d'autres acteurs du service Qualité, mais les techniciens en restent absents. Nous tenterons d'expliquer ce phénomène dans le chapitre suivant. Au-delà de la mesure des performances du système, de nombreuses pratiques visent à les améliorer, ce que nous allons désormais examiner.

4.b. Améliorer le système d'IA : une maintenance épistémique

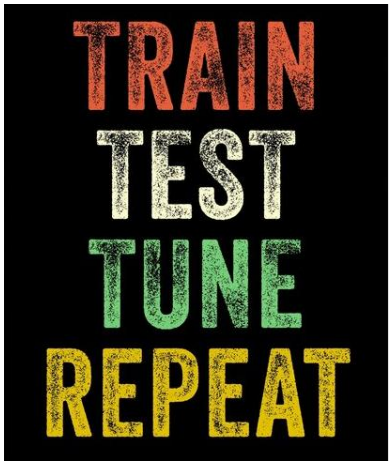


Figure 62 : Poster réalisé par le graphiste MadPanda, qui écrit en description : « C'est un super design si vous aimez l'apprentissage machine, l'intelligence artificielle, l'apprentissage profond ou la science des données » (notre traduction).

Une fois la performance évaluée, l'équipe IA se lance dans l'amélioration du système. Dans cette sous-section, nous chercherons à montrer en quoi le déploiement des systèmes d'IA demande un véritable suivi des systèmes numériques, une amélioration par petits pas : osons-le franchement, une maintenance. Cette maintenance ne porte pas sur les infrastructures matérielles qui soutiennent ces dispositifs (serveurs, centres de données, câbles de connexion) mais sur les savoirs qui sous-tendent le fonctionnement des modèles. Elle est une « maintenance épistémique[310] » à laquelle s'adonnent les membres de l'équipe IA.

La maintenance : un objet d'études

Le travail de maintenance a récemment pris de l'intérêt comme objet d'étude des SHS, notamment à la suite de l'étude de J. Denis et D. Pontille (2010) sur les panneaux signalétiques du métro parisien[311], puis avec la parution de leur livre *Le soin des choses. Politiques de la maintenance* (2022). L'ouvrage, que nous avons brièvement évoqué plus haut (**II.**3.d), rend hommage à la maintenance, « activité d'arrière-plan par excellence » (2022:16), largement délaissée aussi bien dans le débat public que scientifique. En ce sens, la maintenance s'oppose à la réparation, ponctuelle, remarquée, demandée. Selon les auteurs, il ne suffit pas de décrire la maintenance pour l'appréhender complètement. Le livre rend compte d'une variété de rapports que les mainteneurs (aussi bien agents d'entretiens que restaurateurs d'œuvres d'art ou conducteurs chevronnés) entretiennent avec les objets qu'ils sont chargés de maintenir. Nous partirons de certaines des trouvailles des auteurs pour tenter de dépeindre, à notre tour, ce que serait une maintenance épistémique.

[310] Rien à voir avec la « maintenance épistémique » telle qu'elle est décrite en philosophie des sciences (avec le sens de « maintien des croyances »), comme ici (Friedman 2019). Il s'agit plutôt ici d'une « maintenance des dpnnées », tel que le propose – sans plus d'élaboration – E. Kang (2023:2).

[311] Citons aussi le séminaire « Maintenance and Philosophy of Technology » animé par Mark Thomas Young depuis plusieurs années.

Une activité qui s'étale dans le temps

J. Denis et D. Pontille dénombrent plusieurs types de rapport au temps dans les activités de maintenance : prolongation, obsession, ralentissement, et permanence. Dans cette dernière perspective, la permanence, les auteurs donnent l'exemple, relativement insolite, de l'exposition du corps de Lénine, montré chaque jour aux yeux de tous dans un mausolée, à Moscou (aujourd'hui encore). La dépouille de Lénine fait l'objet de traitements chimiques particuliers, conçus pour l'occasion, et orchestrés par une commission *ad hoc* dédiée à sa conservation. Des organes ont été retirés, des fluides sont régulièrement injectés et extraits : le corps de Lénine d'aujourd'hui, n'est plus tout à fait le même qu'à sa mort en 1924. La maintenance est permanente, et elle est modulaire, au sens où chaque aspect de l'objet maintenu (ici du corps), fait l'objet de pratiques d'entretien, de soin, de transformation ; « le remplacement généralisé […] est la principal moteur de la permanence » (Denis et Pontille 2022:212).

De la même manière, l'amélioration de la base de données s'ancre dans le temps, elle « ne fait pas événement » (2022:45), au sens où elle habite les journées de travail de Claude, Jérôme, Etienne. Ils retirent des données, en rajoutent, en créent, esquissant ainsi un patchwork multiforme qui n'a plus grand-chose à voir avec les premiers essais de *dataset*. Les catégories d'hier suivent des logiques différentes de celles d'aujourd'hui, et peut-être de demain (**III.**2.c). Jérôme le dit simplement : « Tout le travail en fait il est dans la codification. Ce qu'on optimise c'est l'annotation. C'est un travail fastidieux[312]. » Les bases de données sont sans cesse parcourues, les annotations sont répétées, remises en question selon une « éternelle répétition » (2022:55). De la même manière, le travail de peuplement de la base de données (**III.**3.a) est une activité de maintenance épistémique qui aspire à parfaire la représentativité et la valeur de vérité des savoirs (au lieu du maintien dans le temps, de la fonctionnalité, de l'esthétique). La focale diffère entre les maintenances d'un objet physique et d'une base de données, mais elles témoignent toutes deux d'une attention particulière.

Faire attention aux choses : l'erreur comme heuristique

Pour J. Denis et D. Pontille, la maintenance repose sur un important déploiement des sens : la vue bien sûr, mais aussi l'ouïe, l'odorat ou le toucher (sensible à la texture, aux vibrations). Pour « activer la sensibilité aux subtiles variétés matérielles de la détérioration » (2022:101), il faut s'approcher et entretenir une proximité avec le dispositif. « L'attention », écrivent J. Denis et D. Pontille (2022:100), « est à la fois le *résultat* et le *motif* d'un déplacement[313]. » C'est en connaissant bien les conditions idéales d'existence des objets que les mainteneurs peuvent déceler les décalages subtils, les dégradations infinitésimales, qui ne seraient pas repérés sans un examen approfondi.

C'est un classique de la sociologie des techniques : les dysfonctionnements des systèmes techniques sont l'occasion de rappeler leur matérialité, et les facteurs sociotechniques, qui permettent de les mettre en œuvre. Cette matérialité est rendue d'autant plus visible lorsque les dispositifs cassent, échouent, dysfonctionnent (Star 1999:382). En ce qui concerne les algorithmes, M. Ananny (2022:6) dénombre, à la Prévert, une pléthore de façons dont ils peuvent faillir : parce qu'ils « se fondent sur des bases de données incomplètes, des catégorisations partiales, des hypothèses imprécises et injustes, des modèles

[312] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juin 2022, approximation.

[313] L'italique vient des auteurs.

économiques extractifs, des compréhensions réductionniste de l'identité et la culture, et plus généralement une esthétique odieuse de la valeur pour l'humain de l'automatisation[314]. » Dans la pratique d'amélioration des systèmes d'IA, l'attention se déploie selon une heuristique de l'erreur. Le rapprochement, s'il n'est pas physique, n'en est pas moins explicite : les membres de l'équipe IA se mettent à leur bureau, se connectent sur un logiciel dédié, et prennent le temps de parcourir les images de plaques. Les tests fournissent un moment particulièrement propice au repérage des erreurs.

L'examen attentif de ces erreurs est une des procédures d'amélioration du système, qui vise, ultimement, à les éliminer. A la suite d'un test de performances réalisé en octobre 2022, Jérôme me montre son écran. Il fait défiler les plaques les unes à la suite des autres. De temps à autre, il revient sur le document Excel qu'il a élaboré pour consigner les résultats, sous la forme d'une matrice de confusion : « Le modèle m'a mis 15 ou 25 cercles en spirale. » Le ClassifiMotif a fait de nombreuses erreurs de même nature, en catégorisant des « cercles » comme des « spirales ». Jérôme visualise des exemples de bonne et de mauvaise catégorisation, adopte une posture contrefactuelle en tentant de comprendre ce qui a poussé le ClassifiMotif à classer d'une façon ou d'une autre. Il conclut : « Faudrait voir dans le training si y'a des exemples qui sont adaptés ou pas. Mais ça veut dire regarder 2000 images… » Ce qu'explique Jérôme, c'est que le *dataset* contient probablement des images de plaques trompeuses, qui servent à exemplifier la catégorie « spirale », mais ressemblent beaucoup à des « cercles ».

Un système rationnel ? Reconstruire l'explicabilité *in situ*

Arrêtons-nous un instant sur ce point. Le raisonnement adopté par l'équipe IA est le suivant : si le système s'est trompé, c'est parce qu'il existe, parmi les données d'entraînement, des *mauvaises* données qui ont induit le système en erreur ; ou bien qu'il n'existe pas parmi ces données d'entraînement toujours, de *bonnes* données qui auraient permis d'aiguiller le système vers la bonne solution. Les membres de l'IA attribuent une forme de rationalité au ClassifiMotif, dont la classification est envisagée comme le résultat d'un processus logique. Une base de données d'entraînement bonne donnera un système bon. Une catégorisation poreuse et pas assez délimitée, des données inadaptées, entraîneraient au contraire le système dans une confusion épistémique.

On ne peut pas vraiment dire que ressurgit ici une anthropomorphisation du système. Le ClassifiMotif est considéré comme rationnel dans une perspective logique, comme le ferait un programme informatique déterministe[315], sans que cette rationalité ne soit incarnée. Du côté des ingénieurs, cette présomption de rationalité sert d'abord à orienter leur action, elle est pragmatique. Sans elle, l'amélioration de la base de données n'aurait pas de sens pratique. La théorie sociomatérielle prend là tout son sens. L'énaction du système, dans un contexte organisationnel qui vise l'efficacité et la performance, se traduit ici par l'attribution d'une caractéristique de rationalité attribuée au système. Celle-ci émerge de l'interaction avec le ClassifiMotif en tant que « technologie-en-pratique » (Orlikowski 2000), elle ne lui préexiste pas. Cette tentative de donner du sens aux productions du système ne peut pas seulement être attribuée à une

[314] « But algorithms fail, in different and intertwined ways. They rely on incomplete datasets, partial categorizations, inaccurate and unjust assumptions, extractive business models, reductionist understandings of identity and culture, and generally odious aesthetics about the human value of automation » (notre traduction).

[315] On retrouve en quelque sorte les méthodes de la cybernétique, décrites par N. Wiener ([1948] 2014), qui visent à traiter les phénomènes comme des boîtes noires au fonctionnement inconnu, et dont l'étude se fait au travers des relations entre entrées et sorties.

projection des ingénieurs, entraînés tout au long de leur formation à l'exercice de la rationalité scientifique. Elle s'intègre, à notre sens, dans une posture méthodique qui cherche à trouver des leviers d'actions : sans eux, l'idée même d'améliorer le dispositif d'IA n'aurait pas de sens.

Nous suggérons que cette présomption de rationalité constitue une tentative des ingénieurs pour aboutir à une « explication située[316] » du système d'IA[317]. L'explicabilité est l'une des formes de la transparence des dispositifs d'IA, une valeur qui apparaît dans de nombreux écrits institutionnels comme un prérequis éthique dans le développement et l'utilisation de ces systèmes (Jobin et al. 2019). M. Pégny et I. Ibnouhsein (2018) la définissent de la façon suivante : « Un algorithme est *explicable* s'il est possible de donner à l'ensemble des utilisateurs, quelque soit leur bagage éducatif, une vision claire des procédures employées et des fonctionnalités remplies par l'algorithme, afin de permettre un usage informé. » En d'autres termes, lorsque l'on parle d'un système considéré comme explicable, il est par définition possible de dégager les raisons des résultats obtenus. La recherche de l'explicabilité résulte de l'opacité structurelle des systèmes d'IA et des modèles économiques qui les font émerger (Burrell 2016). Un compromis entre explicabilité et performance est souvent mis en avant par la littérature en IA, bien qu'il fasse l'objet de controverses (Rudin et al. 2021).

Plusieurs enquêtes ont été menées pour investiguer les modalités de prise en compte de l'explicabilité dans les organisations (Ferguson et al. 2024; Vuarin et Steyer 2023). L'un des objectifs de ces études est d'aller voir si, au-delà des vœux pieux, l'explicabilité est réellement une composante intégrée dans la conception et l'évaluation des systèmes algorithmiques. Les résultats, sans appel, montrent une faible transposition des principes d'explicabilité dans les organisations. En particulier, L. Vuarin et V. Steyer (2023) montrent que l'exigence d'explicabilité est substituée par celle de la performance. Tant que le système fonctionne, l'explicabilité est un paramètre relativement secondaire. L'un des verbatim est à ce titre particulièrement éclairant : « […] "Avec ce business, on ne peut pas expliquer quand on se plante, donc on est obligé de performer". […] » (2023:193). Comme à SemiCorp, la recherche des explications concerne essentiellement celle de l'origine des échecs. Lorsque ces situations sont identifiées, c'est d'abord pour leur trouver une solution. La compréhension du fonctionnement du système d'IA est instrumentale à son bon déploiement.

Dans le service Qualité, les ingénieurs sont ainsi réduits à compenser l'absence d'une véritable expertise technique en méthodes computationnelles, par une expertise autre. Celle-ci se déploie non plus dans les cinq sens comme avec J. Denis et D. Pontille, mais dans la sensibilité au comportement algorithmique du système, telles que les ingénieurs le perçoivent. L'explication qu'ils obtiennent est située au sens où elle dérive des schémas mentaux qu'ils mettent en œuvre pour tenter de faire leur travail au mieux.

316 L'expression « explicabilité située » a déjà été utilisée dans une acception différente (Ferguson et al. 2024). Chez ces auteurs, l'explicabilité située désigne une adaptation de l'explication telle qu'elle est fournie à des utilisateurs. Son caractère situé renvoie à son ajustement face au contexte. Elle est dès lors une information transmise depuis le système vers l'utilisateur.

317 Pour l'anecdote, mon mémoire de master 2 en philosophie des sciences, présenté en 2019 (non publié), portait justement sur l'incapacité mécanique de concevoir des réseaux de neurones artificiels explicables, au sens traditionnel de l'explication de C. Hempel et P. Oppenheim (1948).

Juger par l'intuition

S'ils appellent à ne pas fétichiser l'intuition, qui recouvre des réalités cognitives variées, J. Denis et D. Pontille montrent comment elle émerge, chez les mainteneurs, d'une mobilisation des sens (consciente ou non). Dans la constitution des bases de données d'apprentissage machine, guider l'action par l'intuition constitue un problème épineux. En effet, se fier à son intuition dans l'annotation contrevient à l'idée de données objectivement structurées et annotées. Seulement, il est parfois impossible de baser le jugement sur des critères purement objectivés. Cette tension est mise en évidence dans l'étude de B. Catanzariti (2025), qui a interrogé des individus qui développent ou travaillent avec des dispositifs de reconnaissance faciale, y compris chargés de tâches d'annotation : « Les annotateurs doivent soit domestiquer la subjectivité des expressions faciales en appliquant des schémas d'étiquetage impossibles, rigides et mécanistes, ou bien ils doivent exploiter une intuition "venue des tripes", collective et qui semble aller de soi[318] » (2025:2).

Dans l'équipe IA, le rapport à l'intuition est ambivalent. Nous observons des cas où elle est explicitement rejetée. Quand l'intuition ne suffit pas à trancher, par exemple pour des annotations de motifs, la solution consiste le plus souvent à ne pas intégrer d'exemples ambigus pour ne pas prendre le risque de tromper le système, nous y reviendrons dans la prochaine sous-section.

Dans d'autres situations, l'intuition est (visiblement) mobilisée, par exemple dans l'une des problématiques de la gestion du *dataset*, à savoir sa représentativité. Pour que le ClassifiMotif identifie correctement les motifs, il apparaît nécessaire aux ingénieurs de faire figurer des exemples suffisamment variés de chaque motif, qui représentent l'ensemble des cas de figure possiblement rencontrés. Nous avons vu que les données synthétiques utilisées ne permettaient de résoudre que partiellement ce problème, voire pouvaient l'aggraver (**III.**3.a). À la suite de l'évaluation réalisée en novembre 2022 (**III.**4.a), Jérôme m'explique qu'il a choisi d'ajouter cinquante fichiers KLARF issus de données réelles dans une catégorie où le ClassifiMotif a fait beaucoup d'erreurs. Je lui demande comment il choisit ce nombre (50) : « Là on n'a pas de référence. On en ajoute suffisamment pour que ce soit repéré. » Jérôme ne sait pas encore si ce nombre d'images sera suffisant. Il y a plusieurs milliers de données dans cette catégorie, et cinquante pourraient (ou non) suffire à faire pencher la balance, de sorte que le ClassifiMotif produise de meilleures classifications pour ce motif. Jérôme n'aura la réponse qu'au moment d'une nouvelle évaluation.

Son expertise se construit partiellement dans ce rôle de garant des proportions. Combien de pourcents de tel motif doivent-ils correspondre à telle configuration pour que le système discrimine au mieux ce motif ? La question est vertigineuse, et pourrait sans doute mobiliser une poignée de statisticiens. Faute d'outils pour y répondre, Jérôme fait des essais, se trompe ou réussit. Puis, il met cette expérience à contribution dans des cas futurs.

[318] « [A]nnotators must either domesticate the subjectivity of facial expressions by applying impossibly rigid and mechanistic labelling schemes or harness some kind of self-evident and collective 'gut feeling' » (notre traduction).

Une maintenance en mode dégradé

Chez J. Denis et D. Pontille, la maintenance apparaît comme ancrée dans une matérialité physique. Nous jugeons que l'activité de maintenance peut être colportée dans l'univers numérique, dont la matérialité propre fournit elle aussi des affordances et des entraves. En conclusion du *Soin des choses* (2022:356), les auteurs reconnaissent n'avoir qu'effleuré les pratiques de maintenance industrielle. Nous avons nous-mêmes fugacement rencontré des agents de maintenance en salle blanche, sans pouvoir nous plonger pleinement dans leur activité.

Ce que nous montrons ici, c'est que la maintenance se déploie dans des arènes encore plus vastes que celles qui touchent à la survivance des choses physiques. Devenues maintenance épistémique, ancrées dans un univers matériel numérique, les pratiques de maintenance perdurent mais sont dotées d'angles morts. La maintenance épistémique est décorrélée du toucher : la vision devient le seul mode possible d'attention. La perte d'une matérialité physique efface également tout possibilité d'une accointance, d'un soin porté vers l'objet physique. Les plaques se succèdent, avec leurs noms de code à rallonge. La maintenance épistémique, dans sa dimension numérique, perd la dimension du *care* qui subsiste dans la maintenance physique, d'autant que les mécanismes qui aggravent l'état des plaques ne sont pas toujours connus avec précision. D'autres moyens sont alors mis en œuvre par l'équipe IA pour appréhender le comportement du système, ainsi que nous l'avons montré.

Contrairement aux objets physiques, ce n'est pas tant la base de données qui se dégrade, que la production qui évolue. S'il faut maintenir le *dataset*, c'est parce que son adéquation est mise à l'épreuve par la transformation des plaques, et l'évolution des motifs qui peuvent être traités par le système. Ce n'est pas tant une détérioration physique qu'une détérioration épistémique qui le menace.

Déportée vers les bureaux, la maintenance épistémique voit ses effets reportés : il faut attendre le déploiement d'une nouvelle version avant d'en observer ses conséquences sur le long-terme. L'éloignement des effets est associé à un éloignement des débats sur le dispositif. Claude explique ainsi, un peu désabusé, que les erreurs des ingénieurs du service Qualité font l'objet de vives remarques, voire de reproches, au sein des ateliers. Mais lorsque tout est fonctionnel, les réactions sont plus silencieuses : « quand ça marche, ils [les salariés de la salle blanche] me disent rien, j'apprends par les chefs[319]. »

[319] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juillet 2023.

4.c. Une performance multi-dimensionnelle : aligner le système sur l'organisation

Le quotidien de l'équipe IA est ponctué de pratiques d'amélioration de leurs dispositifs d'IA, de sorte à optimiser leur performance technique, résolument quantitative. Même si cet objectif est central dans le développement des systèmes de classification, nous allons voir qu'en réalité, il reste assujetti à d'autres objectifs relatifs à l'organisation du service.

La gestion ambiguë des ambiguïtés

La revue d'images amène parfois Claude et Jérôme à se pencher sur le cas des données qu'ils qualifient « d'ambiguës », voir (Figure 63). Ces données sont ambiguës au sens où elles mettent en péril le principe de « cohérence » de la classification (Bowker et Star 2000). Elles peuvent par exemple ressembler à deux motifs à la fois, la différence entre « tâche » et « disque » n'étant pas toujours évidente à prescrire. Elles peuvent aussi présenter deux motifs simultanément : il est tout à fait imaginable que deux motifs de défauts, d'origines divergentes ou pas, soient présents en même temps, sur une plaque.

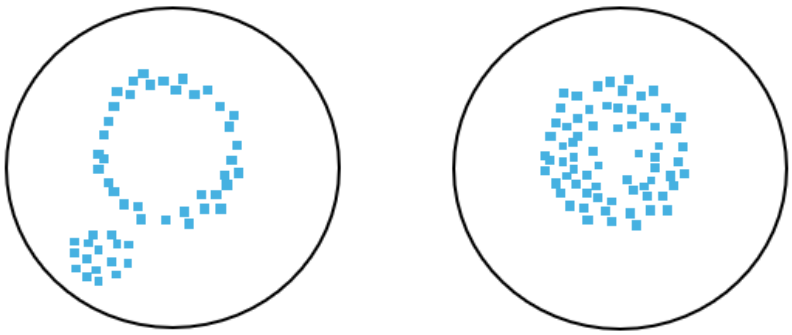


Figure 63 : Deux plaques portant des motifs ambigus. A gauche, il y a à la fois un disque et une tache. A droite, il pourrait s'agir d'un disque comme d'une tache.

Dans ces cas-là, la réaction des membres de l'équipe IA est immédiate. Pour Claude, « si c'est ambigu, je vire […]. Je n'attrape que celles qui sont évidentes[320]. » Du côté de Jérôme, « si y'a un doute, c'est pas utile d'introduire une erreur, on ignore[321]. » Autrement dit, Claude et Jérôme se refusent à peupler la base de données d'exemples ambigus. Ils ne les annotent tout simplement pas. De la sorte, ils maximisent, de leur point de vue, la capacité du ClassifiMotif à apprendre, parce qu'il aura reçu des données sans équivoque. Ils choisissent d'ignorer leur propre jugement et de laisser faire le système.

Ces cas litigieux pourtant, existent bel et bien dans l'atelier Qualité. Que se passe-t-il si le système doit traiter un tel cas de figure ? Il pourrait se tromper, d'autant plus que le but, comme on l'a vu, est de réduire au maximum la présence de motifs indéfinis (**III.**4.a). Mais pour le service Qualité, ça n'est pas si grave. C'est là où le focus quantitatif sur la performance s'effrite.

[320] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en juin 2022.

[321] Propos recueillis lors d'une réunion de travail en septembre 2022.

Alerter avant tout : quand les métriques imposées n'importent plus

L'important, comme le répète à plusieurs reprises Régis, est de « *hold* » les lots qui font l'objet d'une alarme, c'est-à-dire de retenir les lots dans l'atelier du service Qualité pour de plus amples investigations. Il faut sonner l'alerte et régler le problème le plus rapidement possible. Peu importe si le motif désigné aux techniciens en salle blanche n'est pas le bon. Autrement dit, peu importe si le ClassifiMotif se trompe et si sa performance technique est dégradée.

Sur l'échelle de priorité du service Qualité, il est plus grave de ne pas détecter un problème que de détecter un problème en le qualifiant mal. Dans cet ordre d'idée, il apparaît pertinent de conserver des sources d'erreurs connues, puisque les régler pourrait générer de nouveaux problèmes. En intégrant le système d'IA dans le service, le principe d'équivalence des erreurs (H5) se voit contesté par l'organisation et ses acteurs.

Le traitement réservé aux données ambiguës rend compte d'un phénomène qui paraît d'abord contre-intuitif : la détérioration des performances du système n'est pas perçue comme un mal en soi. Les objectifs quantitatifs fixés à l'équipe IA par le service Qualité peuvent être remis en cause par leurs managers, au nom d'intérêts plus larges du service Qualité. La performance technique du ClassifiMotif est seulement instrumentale à son développement. Au bout du compte elle n'est pas une marque absolue de son intérêt pour le service.

Cette dynamique de flexibilité vis-à-vis des performances du ClassifiMotif est impulsée par le management du service Qualité, au travers de Régis, qui dirige l'équipe IA : « Moi l'objectif qu'on m'a donné c'est améliorer la qualité de la fab[322] ». Cette amélioration de la qualité, de son point de vue, ne passe pas tant par l'amélioration des métriques de classification du ClassifiMotif, que de sa bonne intégration dans l'organisation du service Qualité. Les échanges organisés avec les autres équipes et les managers sont le moyen de ce déploiement réussi (**III.**3.b). De bonnes métriques en sont aussi, bien sûr, mais ne se révèlent pas être le seul critère de réussite.

Deux voies semblent se profiler pour l'équipe IA : (1) maximiser la performance technique en réduisant autant que possible les erreurs du système, et (2) réguler leur propre charge de travail en permettant à certaines erreurs de continuer à être faites par le système. Ces objectifs d'apparence divergents n'entrent pourtant pas en conflit. La prise de conscience de cette incohérence conduit Régis à réduire les exigences portées sur le ClassifiMotif. A l'occasion d'une discussion entre Régis, Jérôme et moi-même, j'ai l'occasion de demander quels sont les critères de déploiement effectif du ClassifiMotif. Jérôme explique : « Si on n'a pas un bon score F1, on met pas en prod […]. On va viser 80, 85 %[323]. » Ce sont les seuils que nous avons déjà donnés (**III.**4.a). Ils découlent de recommandations données par les collègues d'EuroSite, qui ont leur propre ClassifiMotif local. La réponse de Régis ne se fait pas attendre, il place ses paumes de main devant lui, vers le bas (comme quelqu'un qui voudrait dire « du calme ») et réplique : « Nan, mais on vise les objectifs [note : moins exigeants] donnés par le *corporate*. » Régis est prêt à

322 *Idem*.

323 *Idem*.

sacrifier une partie de la performance technique du système – et donc à simplifier son amélioration technique, menée par Jérôme – pour s'assurer d'un déploiement plus prompt du système

Il ne s'agit plus tant « d'apprivoiser » les erreurs algorithmiques que de les « optimiser » (Aradau et Blanke 2021). Les erreurs deviennent acceptables tant qu'elles sont circonscrites à des situations que le service Qualité se sent à même de gérer. Cette vision se concrétise sur le plan organisationnel par la mise en place de temps de travail dédiés. Fin 2023, alors que le ClassifiMotif a été déployé, des revues hebdomadaires sont menées avec l'équipe Suivi Temps Réel et les managers du service Qualité pour suivre les lots remontés. Des suggestions d'amélioration y sont émises et concernent par exemple des changements du modèle algorithmique ou des ajustements des critères d'alarme.

Assujettir le système aux contraintes de l'organisation

En réalité, bien que cela puisse paraître paradoxal, un système qui détecterait trop bien les problèmes qualité pourrait perturber le fonctionnement de l'organisation du service Qualité. Il serait presque souhaitable qu'il ne soit pas trop performant sur le plan quantitatif.

Lors de la réunion que nous venons d'évoquer, Régis explique qu'il faudra « relâcher » les systèmes d'alerte présents dans le service Qualité. Il existe déjà, en effet, de nombreux dispositifs chargés de produire des alertes, lesquelles impliquent elles aussi un examen postérieur réalisé par les techniciens qualité. Or, avec le déploiement du ClassifiMotif, il y a fort à parier que de nouvelles alertes seront produites, et en particulier, des alertes qui n'auraient pas été émises sans lui. Sans même parler ici de pratiques d'appropriation du système, le ClassifiMotif devrait provoquer, mathématiquement, une hausse du nombre d'alertes, et donc une hausse générale de la charge de travail. Cette charge de travail nouvelle s'additionnerait avec celle induite par l'augmentation de la production, planifiée à l'échelle du site durant notre étude.

Dans ce contexte d'augmentation de la charge de travail, la réponse adoptée par le service Qualité n'est pas d'augmenter la capacité productive en employant plus de salariés, ou le volume des ateliers en achetant plus de machines d'inspection. Des contraintes budgétaires empêchent le management de répondre à cet accroissement de la quantité de travail par des recrutements en masse. A la place, Régis est chargé de compenser la hausse de la charge de travail en cherchant à la diminuer ailleurs, localement : « il va falloir relâcher ». Son objectif est de s'assurer qu'en moyenne, environ 10% des lots passent par l'atelier de qualité, pas moins, et surtout pas plus, au risque de surcharger les équipes en salle blanche comme dans les bureaux. « La production sait gérer plusieurs centaines de lots *hold* par semaine, ça correspond à environ 10 %. […] Je peux faciliter le travail, mais au final l'opérateur doit analyser. » Ces contraintes permettent de mettre en relief la remarque d'un impératif moral de l'automatisation (**II.**2.b). Elles montrent aussi comment, de façon surprenante, la charge de travail est en réalité un facteur qui peut être piloté par les managers, dans un contexte où la capacité effective de travail est plutôt une donnée qu'une variable.

Le risque économique associé à la production de plaques de mauvaise qualité est ici relativisé. Les travaux en psychopathologie du travail, et notamment ceux de C. Dejours, ont effectivement montré que ces risques sont soumis à une interprétation collective et située (Ughetto 2018a:57). Ce qu'implique le raisonnement du « relâchement », c'est que le qualificatif de *plaque de qualité* ne dépend pas uniquement

de caractéristiques intrinsèques à la plaque, ou même de critères subjectifs d'appréciation. La qualité découle aussi de la capacité du site à traiter ces problématiques sur le plan organisationnel. Si le service Qualité est à même de traiter 10% des lots, alors seuls 10% des lots pourront être considérés comme étant de mauvaise qualité. La capacité de mesure devient un facteur de régulation de l'organisation.

Redéterminer un système stochastique : signaux faibles et motifs cosmétiques

« Relâcher » les autres systèmes d'alerte, pour reprendre le terme utilisé par Régis, consiste à abaisser les seuils d'exigence sur ce qui constituerait un problème de qualité. Des alertes sont typiquement déclenchées lorsqu'un seuil est dépassé sur la quantité surfacique de défauts détectés sur la plaque. Si une plus grande tolérance est acceptée sur ce critère, le nombre d'alertes émises sur cette base peut être réduit.

En pratique, comme le révèle Régis en réponse à une interrogation de ma part sur un potentiel relâchement du ClassifiMotif, « Y'a deux choses. Le ClassifiMotif il détecte le motif, après y'a ce que t'en fais… » L'idée est de découpler la détection d'un motif, et l'alerte envoyée au service Qualité. La détection d'un motif particulier n'est ainsi plus suffisante à produire une alerte, au sens où le résultat algorithmique ne suffit pas à déterminer à lui seul la décision. Ce résultat a déjà été montré pour des systèmes d'aide à la prise de décisions dans les hôpitaux (Bailey et al. 2020). Un tel choix organisationnel se justifie par une volonté d'ordonner les alertes, entre celles qui méritent l'attention du service Qualité, et celles qui pollueraient le flux informationnel. Toutes les alertes ne se valent pas. Il existe en effet des faux motifs, que ne souhaite pas détecter le service Qualité. Ce sont des motifs bénins, qui ne justifient pas d'alerte. Ces faux motifs peuvent être de plusieurs natures, décrivons-en deux ici.

Un premier type est celui des motifs dits « signaux faibles ». L'un des objectifs initiaux du ClassifiMotif était de pouvoir détecter des problèmes de qualité très en amont, en repérant des indices révélateurs de problèmes qualité potentiels à venir sur des machines en cours de dérive. Or, ces signaux faibles sont parfois si faibles qu'ils se confondent avec des plaques tout à fait normales.

Pour remédier à ce problème, au cours de l'année 2023, Jérôme a scindé certaines catégories de motifs. Par exemple, la catégorie unique « trait » est séparée en deux : « grand trait » et « petit trait ». Selon la capacité du système à discriminer les « petits traits » des plaques dites « normales », Jérôme peut si besoin désactiver les alertes émises sur cette base.

Les « motifs cosmétiques » sont un second type de motifs jugés inoffensifs. Ce sont des motifs sans gravité, mais qui sont détectés comme n'importe quel autre motif, parce qu'ils présentent des distributions similaires. Il n'est possible de savoir si un motif est cosmétique que si l'on connaît le contexte d'apparition de ce motif. A certaines étapes de fabrication, sur certaines machines, pour certaines technologies, des motifs peuvent se former de façon normale, sans que cela n'impacte l'électronique présent sur la plaque. Le recensement de ces cas de figure mobilise plusieurs équipes du service Qualité. En principe, en effet, le ClassifiMotif ne se trompe pas lorsqu'il détecte un motif cosmétique : ce motif est bel et bien présent, mais ne pose pas problème étant donné le contexte particulier dans lequel il apparaît.

Dans le cas des motifs cosmétiques, l'équipe IA ajoute une couche logicielle supplémentaire pour faire traiter les cas litigieux. C'est une solution mise en place assez tardivement dans le projet, comme me

l'explique Régis en septembre 2023 : « A certaines étapes, si tu détectes un cercle à ce niveau, tu dis au système, "celle-là tu l'oublies". […] Faut pas que ça arrive trop souvent sinon ça fait trop de *scope*[324]. »

Grâce à sa connaissance pointue du processus de fabrication et des modalités d'apparition des motifs cosmétiques, le service Qualité peut prédire, à l'avance, les cas de figure où ces motifs pourraient émerger. Les données d'entrée utilisées reprennent dès lors une importance pour recontextualiser les résultats du système : l'hypothèse de myopie des entrées (H3) a été remise en question au cours de l'expérience. D'autres ingénieurs du service Qualité sont engrainés, et notamment l'équipe Amélioration Qualité. C'est elle qui parcourt « cas par cas, machine par machine » (Jérôme), la bibliothèque de motifs qui peuvent être considérés comme cosmétiques, et qui fixe les cas d'exception. L'équipe IA met ensuite en place de nouvelles « règles déterministes », comme celles que décrit C. Girard-Chanudet (2023a:416). Les prédictions du système sont réinscrites dans une logique décisionnelle en forme d'arbre de décision. Ainsi on assiste, en quelque sorte, à une hybridation entre systèmes d'IA connexionniste et symbolique. Ce faisant, les performances initiales du ClassifiMotif sont tout de même dégradées, puisque des résultats de classification éprouvés sont contredits en vertu de son intégration dans les processus d'alerte. La performance technique du système est soumise aux contraintes de l'organisation dans laquelle il est intégré.

[324] Le *scope* est le périmètre d'action du système. Le terme peut aussi renvoyer au périmètre d'action d'un salarié (son *scope* correspond alors à ce qui dépend de lui). Ici, « trop de *scope* » signifie qu'il pourrait y avoir trop de cas particuliers, dont la gestion pourrait être compliquée.

Conclusion (III.4)

Le travail normatif d'évaluation des systèmes d'IA repose sur une objectivation de leur capacité classificatoire, orientée selon des métriques quantitatives. Les obtentions de ces résultats d'évaluation sont des moments-clés des projets d'IA, qui orientent l'action à venir : peut-il être déployé ? que doit être amélioré ?

Nous avons vu que cette objectivation était présidée par un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui permettent de transformer les pratiques de classification en des activités mathématisées. C'est à ce prix qu'il est ensuite possible de rendre compte à l'organisation de l'intérêt et de la qualité du système. Au cours du projet, la majorité de ces hypothèses se voient contredites par l'expérience organisationnelle, voir (Tableau 11).

Hypothèse	Nom	Statut au sein de l'équipe IA
H1	*Conséquentialisme*	Partiellement remise en cause.
H2	*Capacité d'abstraction du contexte*	Pas remise en cause.
H3	*Myopie des entrées*	Remise en cause
H4	*Modélisation quantitative*	Pas remise en cause.
H5	*Erreurs équivalentes*	Remise en cause.
H6	*Qualité des données de test*	Remise en cause.

Tableau 11 : Evolution du statut des hypothèses des pratiques d'évaluation des dispositifs d'apprentissage machine, relevées par (Hutchinson et al., 2022).

La prise de conscience de l'importance du contexte de collecte des données, du processus industriel dans lequel il s'inscrit, des conséquences potentielles d'une non-détection des problèmes qualité, contribuent à affiner le dispositif. Au fur et à mesure de ces essais, le ClassifiMotif est expérimenté, adapté, accommodé. Parce que ce système n'existe pas par lui-même, et qu'il est inscrit dans une organisation productive, la stratégie de fiabilisation du système passe finalement par des canaux alternatifs. Au-delà de la seule performance quantitative, d'autres attentes normatives pèsent sur le dispositif. Celles-ci ne sont pas toutes équivalentes, puisque c'est la satisfaction des objectifs de l'organisation qui prime ultimement. Il peut alors devenir nécessaire, pour piloter les flux de l'organisation, d'ajuster la prise en compte des différentes sources d'alerte qualité, de sorte à ne pas dépasser des seuils qui mettraient en péril la capacité des ateliers à traiter l'ensemble des alertes. L'examen des hypothèses qui survivent à l'expérimentation (H2, H4) montre que l'abstraction et la mathématisation des problèmes restent des outils clés au service de la production industrielle, rappelant au passage que l'organisation du travail reste adossée à des logiques de gestion scientifique du travail.

Et tout ça en fait, du travail. Les activités d'amélioration du système convoquent les sens, l'intuition, l'expérience. D'aucuns trouveront peut-être le terme de « maintenance épistémique » exagéré, il nous semble au contraire qu'il révèle la fragilité de systèmes qui ne parviennent à fonctionner que parce que des individus se vouent indéfectiblement à leur entretien, jour après jour. Toute une sensibilité se développe autour de l'appréhension de ces systèmes. Leur complexité engage les salariés à leur contact dans un processus de construction de sens, tâtonnant et expérimental. Loin d'être une solution miracle, l'IA demande des miracles d'ingéniosité pour constituer une tentative de solution pour l'organisation. Malgré tout, et c'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre, l'introduction de l'IA est aussi un

facteur de déstabilisation de l'organisation, en contribuant à déplacer des tâches et des responsabilités et en affectant par là même le travail des salariés.

Chapitre IV – Configurations et reconfigurations du travail de la salle blanche à l'heure de l'IA

Certains souvenirs d'événements totalement banals perdurent dans le temps sans qu'on sache trop pourquoi. Je me rappelle être avec mon père, dans la voiture, écoutant comme souvent la radio Nostalgie. Je dois avoir huit ans. Alors que le *Jim* d'Alain Souchon se réveille à l'hôpital et que la musique se termine, mon père m'explique qu'il préfère les chansons qui racontent des histoires. Elles sont plus intéressantes, elles sont plus vivantes. J'ai été marqué par cette confidence finalement assez intime, de la part de quelqu'un qui ne parlait pas beaucoup, et surtout pas de lui. Devenu chercheur en sociologie, j'ai trouvé ce même goût, de façon inattendue, dans la lecture d'études scientifiques. Au-delà de leur qualité intellectuelle, certains travaux racontent aussi des histoires. Ces récits ont aussi bien un intérêt pédagogique (Padian 2018) que scientifique, lorsqu'ils permettent d'affiner la compréhension d'une étude de cas (McGulre 1995). Pour introduire ce chapitre, voici donc un « cas narratif » (*narrative* case) tirée d'une étude remarquable de S. Pachidi et son équipe (2021) : les auteurs mobilisent explicitement cette méthode pour enrichir et affiner la compréhension du phénomène qu'ils étudient. Ce cas nous permettra d'appréhender la transformation des organisations impulsée par des dynamiques de changement technologique sous l'angle de la reconfiguration des rôles professionnels.

« Faire de la place pour l'algorithme »

S. Pachidi et ses collègues (2021) s'appuient sur l'analyse sur le long-terme d'un déploiement d'un modèle algorithmique prédictif dans un service de ventes aux professionnels d'une grande entreprise de service en télécommunications, autour des années 2010[325]. Dans cet environnement, les chercheurs observent comment les chargés de clientèle se voient être tout bonnement remplacés par une équipe d'experts en mégadonnées (*data scientists*). Loin d'être subite, cette réorganisation est le fruit d'un processus progressif de légitimation des experts en mégadonnées et de leur modèle algorithmique, au détriment des chargés de clientèle. Les auteurs de l'article narrent chronologiquement la succession des événements.

L'histoire débute ainsi. Des experts en mégadonnées sont employés par l'entreprise pour travailler sur des techniques d'analyse de données (*data analytics*). Ces experts en mégadonnées vantent les mérites de ces nouvelles techniques qu'ils imaginent révolutionner les pratiques de marketing et de vente. Bien que le groupe des experts en mégadonnées n'ait aucune autorité sur le département des ventes, ils développent, d'abord de façon isolée, un outil d'analyse des ventes basé sur des algorithmes de modélisation et d'optimisation à partir de données internes et externes à l'entreprise (transactions des clients, données de marché, données financières, données d'utilisation). Ce modèle est supposé prédire les meilleures opportunités de vente en indiquant, pour chaque client et de manière priorisée, quelle est la meilleure voie à suivre (par exemple *aller lui vendre*, ou *aller l'informer*). En juin 2012, les experts en

[325] La présente restitution est adaptée d'une fiche de cas d'étude rédigée pour un atelier pédagogique à destination d'un public d'étudiants ingénieurs, en collaboration avec Thomas Reverdy.

mégadonnées suggèrent d'employer le modèle pour améliorer l'efficacité et l'efficience des processus de vente.

Des réunions sont d'abord organisées autour du modèle algorithmique. Elles sont imposées aux chargés de clientèle par le management, ils s'y rendent pour *faire bien*. Les experts en mégadonnées en profitent pour promouvoir le modèle sans mentionner l'éventualité qu'aurait celui-ci à modifier les pratiques de travail existantes. Ces interactions participent à légitimer la voix des experts en mégadonnées au sujet de la stratégie client. Les chargés de clientèle, dubitatifs pour la grande majorité, ne participent pas aux essais pratiques.

Dans un second temps, une seule équipe, encouragée par une manager enthousiaste, adopte le modèle, dont l'amélioration est continuellement assurée par les experts en mégadonnées. Les chargés de clientèle ne sont pas persuadés de son efficacité mais se plient à la directive en inscrivant, même si ça n'est pas le cas, que le modèle les a orientés dans telle ou telle décision de vente. En cela, les utilisateurs donnent l'impression d'utiliser le système alors que la plupart d'entre eux le rejettent.

Les résultats du modèle apparaissent très bons. Ces résultats sont bien entendu déformés, car les chargés de clientèle n'utilisent pas vraiment le dispositif et font semblant. Pour autant, les experts en mégadonnées puis les cadres de l'entreprise se convainquent de l'intérêt du modèle, étant donné ses performances dont ils ignorent qu'elles sont faussées. Son usage est rapidement systématisé. Les chargés de clientèle suivent ces requêtes en indiquant qu'ils ont recours au modèle durant leur travail, alors qu'il n'est toujours pas (ou peu) utilisé en réalité.

A l'occasion d'un plan de réduction des coûts, l'entreprise décide de réorganiser complètement le service de vente car le modèle leur a définitivement démontré son intérêt. S'ensuivent des licenciements dans le service des chargés de clientèle et un recours accru à la sous-traitance. Les experts en mégadonnées sont désormais chargés de l'identification des opportunités de vente traitées dans des organisations externes. Au travers de leur acceptation feinte d'une technologie nouvelle, les chargés de clientèle ont ainsi participé à construire une représentation favorable du système, déconnectée de leurs pratiques. C'est ce décalage qui a en partie conduit à leur éviction ultérieure.

Etudier la reconfiguration des organisations

L'étude de S. Pachidi et ses collègues est particulièrement riche pour comprendre les mécanismes de transformation des organisations confrontées à l'introduction de nouvelles technologies. Si des technologies peuvent bien participer à des mouvements de remplacement, ce n'est pas tant un remplacement par la technologie, que par le groupe professionnel en charge de cette technologie. Ce sont des choix économiques de la part d'acteurs plus haut placés hiérarchiquement qui, ultimement, entérinent la situation. Elle conduit à conclure un processus de déplacement des tâches qui s'est trouvé progressif, et continu. Petit à petit, les tâches-métier de la relation client, mathématisées par le modèle, se sont transformées dans leur contenu et ont quitté la responsabilité des chargés de clientèle pour se déplacer vers les experts en mégadonnées.

Pour discuter théoriquement des transformations des organisations dans le cadre du déploiement de technologies, P. Leonardi et S. Barley (2010) mobilisent la perspective de l'*alignment*. La traduction

littérale étant à notre sens peu appropriée, nous remplacerons ici le terme par « reconfiguration ». Cette approche concentre l'analyse sur l'évolution des rôles professionnels et des relations qui les structurent. Elle se positionne en surplomb, en embrassant l'ensemble d'une organisation (une équipe, un service, voire une organisation privée, publique, associative tout entière). L'introduction des technologies, un peu comme dans l'énaction, est considérée comme un processus émergent, qui peut produire des résultats inattendus (Leonardi et Barley 2010).

L'une des premières études citée par les auteurs pour illustrer leur cette approche est justement celle de l'un d'eux, que nous avons évoquée en introduction de la thèse (Barley 1986). Elle porte sur l'implantation de scanners à rayons X dans les hôpitaux du Massachussetts aux Etats-Unis. Dans l'un des hôpitaux, la mise en œuvre du scanner amène à un échange d'informations mutuel et informé qui bénéficie aux radiologues et aux manipulateurs de ces scanners. Dans l'autre hôpital, au contraire, les manipulateurs deviennent de simples exécutants, dirigés par les radiologues. La thèse du déterminisme technologique, bien sûr, en prend un coup : l'article montre comment le déploiement de technologies similaires en tout point conduit pourtant à des organisations du travail différentes. Plus généralement, l'analyse par le prisme de la reconfiguration s'intéresse à l'organisation existante, en regardant comment elle façonne les processus d'appropriation des technologie, et comment ces processus peuvent contribuer à maintenir ou altérer les relations sociales (Leonardi et Barley 2010:25).

L'approche par la reconfiguration a des implications importantes, au sens où elle remet les enjeux de relation de pouvoir au cœur de l'analyse (Leonardi et Barley 2010:29). Dans les organisations, l'utilité des systèmes techniques est en général décrétée et cadrée discursivement par les groupes en charge de les implémenter. De ce fait, ces acteurs ont la maîtrise de ces dispositifs et de la manière dont ils devraient être utilisés (Zuboff 1988) (citée par (Leonardi et Barley 2010)). S. Barley (1986:107) montre ainsi que les modalités de reconfiguration sont d'autant plus difficiles à anticiper lorsque les professionnels en charge du déploiement technologique bénéficient d'une importante autonomie. Ils peuvent dès lors orienter les dynamiques d'introduction du dispositif selon leurs propres intérêts, qui font intervenir des facteurs moins macroscopiques. Ces résultats restent dépendants de la réaction des salariés impliqués, dont des résistances trop importantes peuvent pousser les déployeurs à revoir ces modalités – ou à opérer des manœuvres de contournement des salariés (Galper 2020).

On pourra reprocher à la reconfiguration de mettre de côté la dimension économique des changements technologiques. L'organisation qui s'affaire à intégrer de nouvelles technologies vise des objectifs particuliers : productivité, profit, qualité de la production, image de marque. Ces variables doivent entrer en ligne de compte pour comprendre, précisément, comment la structure des organisations contraint et permet l'activité de travail des salariés.

Configurations et reconfigurations sociotechniques

Parler de reconfiguration amène naturellement à s'interroger sur ce que constitue d'abord une configuration. Pour caractériser les relations humains-machines, à plus forte raison celles qui intègrent de l'IA, J. Velkosvka et M. Relieu (2021) empruntent la notion de « configuration sociotechnique » à L. Suchman (2006). Elle permet de se concentrer sur « les articulations [des] aspects imaginaires et matériels [des technologies] » (Velkovska et Relieu 2021:227). La configuration autorise à dépasser le

cadre de « l'interaction humain-machine », qui se trouve mis en défaut dans de nombreuses situations où il est clair que le système n'interagit pas avec son utilisateur[326]. L'approche configurationnelle témoigne ainsi de la complexité des situations d'usage et de la possibilité d'étudier leurs variations (Velkovska et Relieu 2021). Certaines configurations peuvent intégrer des technologies données, d'autres pas ; les configurations peuvent en tous cas légèrement différer dans la place laissée à la technologie dans le processus décisionnel. C'est par l'analyse fine de ces variations que peuvent être décelées les conditions et les causes de potentielles améliorations ou détériorations des conditions de travail. En ce sens, certaines configurations peuvent être qualifiées de « capacitantes » ou « d'aliénantes » pour les salariés (Borel et al. 2024a).

La perspective sociotechnique de la « reconfiguration » de P. Leonardi et S. Barley est équivalente à l'étude des variations organisationnelles des « configurations » de L. Suchman lors des projets d'intégration de nouvelles technologies.

Sur le plan méthodologique, l'étude de la reconfiguration place la focale sur les tâches réalisées en lien avec les technologies introduites : comment ces tâches sont-elles transformées dans leur contenu ? sont-elles déplacées d'un groupe à un autre ? qui en porte la responsabilité ? C'est sur le temps long que ces études peuvent pleinement saisir les transformations en cours, de sorte à comparer l'*avant*, et le *pendant* de l'intégration d'une technologie (Leonardi et Barley 2010).

Pour cadrer l'approche par la reconfiguration, il est utile de se tourner vers les études attestant des évolutions de l'organisation du travail dans le monde industriel[327]. La littérature met en évidence des phénomènes variés, allant souvent de pair : la transformation des tâches, le déplacement de ces tâches de certains groupes professionnels vers d'autres, l'affaiblissement de la coopération et de l'apprentissage, et le contrôle accru du travail. Ces enjeux, que nous allons rapidement explorer ci-dessous, constituent autant de points d'attention pour les sociologues des organisations, mais aussi pour les membres des organisations eux-mêmes, impliqués dans ces transformations, voir le schéma synthétique (Figure 64).

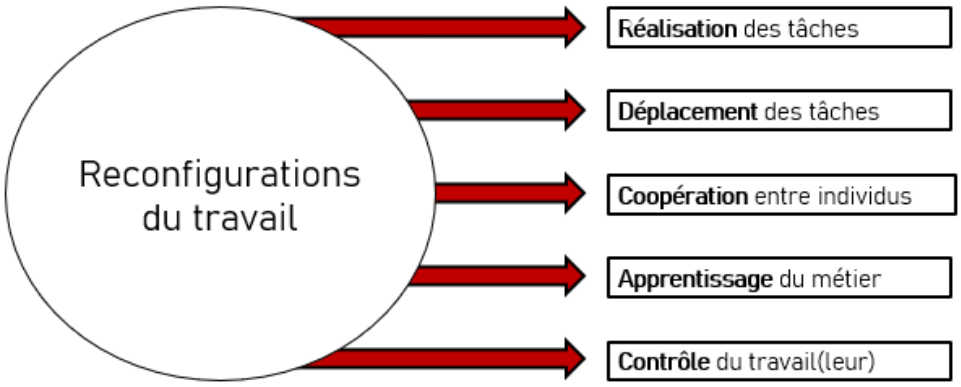


Figure 64 : Potentielles transformations organisationnelles dans le déploiement de nouvelles technologies.

[326] Le cas du ClassifiMotif est typique de cette absence d'interaction, du fait qu'il délivre seulement des prédictions sur la base des données de production. C'est en ce sens que S. Craipeau (2001:14) rejette partiellement les hypothèses de la théorie de l'acteur-réseau, en niant les capacités d'actants non-humains à élaborer des stratégies et à négocier.

[327] L'introduction de ce chapitre est très largement inspirée d'une revue de littérature (non publiée à date de publication de cette thèse) réalisée avec Thomas Reverdy.

De la réalisation des tâches à la vérification de la réalisation des tâches

Au cours de l'intégration d'une technologie, le contenu des tâches allouées aux travailleurs peut évoluer. Dans l'industrie du semiconducteur par exemple, les activités des opérateurs et techniciens de production se déplacent vers des activités de surveillance et de gestion des défaillances (Blanc-Brude et Defélix 2023). La gestion de ces dysfonctionnements, complexe, et pour laquelle les salariés ne sont pas nécessairement formés, est compensée par un appui fort sur le collectif, sur la coopération intra-équipes. Celle-ci n'est pas toujours suffisante, et les équipes en salle restent fortement dépendantes de leurs collègues ingénieurs, travaillant aux bureaux. Nous aurons l'occasion de revenir sur ces transformations dans le cas de SemiCorp.

L'expérience de réalisation des tâches peut aussi être dégradée. D. Gaborieau (2012, 2017) documente l'introduction de systèmes de commande vocale, matérialisés par des casques, dans le travail des préparateurs de commande. Ces dispositifs ordonnent séquentiellement les produits à récupérer, ce qui empêche les préparateurs de commande de composer leur propre parcours en avance dans l'entrepôt. Cette marge de manœuvre est pourtant le moyen de permettre de collecter les produits de telle sorte à équilibrer les palettes qu'ils sont chargés d'empiler et d'emballer. Cette compétence, valorisée par les préparateurs de commande, est ainsi détériorée par l'introduction du système, et surtout par les choix de conception de celui-ci.

Déplacement des tâches

Comme l'a montré l'étude rapportée en introduction de ce chapitre, l'automatisation des tâches (même lorsqu'elle est déficiente) peut aussi conduire à leur réattribution d'un groupe professionnel vers un autre (Pachidi et al. 2021). Ce sont souvent les personnels perçus comme les moins qualifiés, et dont les tâches sont considérées comme les plus automatisables, qui font alors les frais de ces transformations en étant dépossédés d'activités qui constituaient leur cœur de métier.

Une étude socio-historique marquante dans les chantiers navals australiens intègre le processus d'automatisation en cours dans une vague de transformations successives depuis les années 1950 (Gekara et Thanh Nguyen 2018). D'autres vagues de grands changements y ont en effet été recensées : conteneurisation avec l'avènement d'un standard de transport des marchandises ; puis numérisation du travail ; et désormais automatisation des tâches. Les auteurs notent une réduction importante du nombre de dockers dans le temps, ainsi que la disparition des conducteurs de chariots cavaliers, au profit de chariots automatisés, pilotés à distance. Dans le même temps un nouveau rôle apparaît, celui de téléopérateur, chargé d'assister à distance les chauffeurs routiers au moment du chargement et du déchargement des camions. La « criticité » des emplois, c'est-à-dire leur centralité dans la gestion des flux marchands (Gekara et Fairbrother 2013), est transférée des ouvriers de première ligne, dont les activités étaient intenses physiquement, vers les opérateurs de machines à distance.

Ce déplacement peut être plus radical géographiquement, et s'inscrire dans des logiques de délocalisation du travail, sans qu'il n'y ait d'automatisation à proprement parler. Dans l'industrie automobile par exemple, les simulations virtuelles d'accidents ont peu à peu pris le pas sur les essais

physiques réels (Bailey et al. 2012). Les ingénieurs ont assisté à une augmentation de la virtualité du travail, entre éloignement géographique des équipes et médiations des relations aux objets par des technologies numériques (jumeau numérique, capteurs). L'étude de D. Bailey et ses collègues montre pourtant toute l'importance d'une proximité physique avec les véhicules, ne serait-ce que pour valider les modèles utilisés. Dans l'entreprise investiguée, des programmes de réduction des coûts poussent ses cadres à transférer une partie de l'activité de contrôle en Inde, où la main-d'œuvre est moins coûteuse. La méconnaissance du fonctionnement technique de ces véhicules par les ingénieurs locaux, peu formés, dont beaucoup ne disposent pas eux-mêmes de voitures, conduit à des aberrations techniques dommageables et coûteuses.

Fluctuation des régimes de coopération

De façon générale, les systèmes de capteurs sont l'occasion d'une mise à distance des salariés du lieu où se produit l'action. Les motivations sous-jacentes sont facilement compréhensibles dans le cas de milieux hostiles ou difficiles d'accès, comme dans l'industrie minière, où K. Jonsson et ses collègues (2018) s'intéressent à des jumeaux numériques, outillés par des capteurs mesurant l'état des équipements. L'étude décrit une situation « d'incertitude coordinatoire ». Les salariés éloignés, chargés d'opérer des analyses des résultats des capteurs, ne disposent pas de l'ensemble des informations relatives aux événements qui se déroulent sur place – et qui échappent à l'instrumentation. Ils se trouvent alors contraints par la transmission d'informations des salariés qui sont présents sur site. La numérisation du travail génère des chaînes nouvelles d'interdépendances qui accroissent au global la complexité de la résolution des problèmes et la fragilité de l'organisation.

Dans d'autres cas, l'automatisation de tâches, par exemple pour le transport de pièces, peut affaiblir la coopération entre les salariés. C'est le constat que fait J. S. Carbonell (2020) dans l'industrie automobile, où des systèmes automatisés (AGV) sont déployés pour acheminer des kits de pièces à monter par les techniciens. Ceux-ci n'ont plus à naviguer au sein de l'atelier de fabrication pour récupérer leurs pièces, le travail s'en trouve moins éreintant sur le plan physique. En contrepartie, les ajustements informels qui pouvaient exister entre les techniciens et les responsables de ligne en cas de manque de pièce ont été supprimés. Les monteurs sont moins réticents à signaler une erreur sur les lignes d'assemblage puisque la charge de l'exactitude des pièces est reportée sur les « kitteurs » (*kitters*) qui réunissent les pièces pour constituer les kits[328]. La responsabilité des erreurs a en fait été déplacée.

Processus d'apprentissage

Salariés expérimentés et novices n'intègrent pas similairement les nouvelles technologies dans les processus de travail. Dans son enquête auprès de services de chirurgie étasuniens, M. Beane (2019) montre les difficultés auxquelles font face les apprentis-chirurgiens dans leur initiation aux gestes techniques du métier. Ils sont assistés de robots-chirurgiens qui réalisent une large partie du travail à leur place et qui les privent d'un apprentissage de gestes techniques minutieux. Voir faire, en effet, ne suffit pas à leur apprendre à faire. Pour parvenir à assimiler les ficelles techniques du métier, M. Beane montre comment les chirurgiens néophytes mettent en place tout un ensemble de stratégies (que l'auteur appelle

[328] Pour J. S. Carbonell (2020), la nouvelle position de kitteur s'apparente au travail des salariés de la logistique dans les entrepôts, voir par exemple (Gaborieau 2012).

« *shadow learning* ») : spécialisation précoce, répétitions en conditions non réelles (pratiques sur des logiciels de simulation rudimentaires, visionnage de vidéo YouTube) ou expérience de la galère (en opérant à la limite de leurs capacités). Ces inconvénients ne sont pas du tout rencontrés par les chirurgiens déjà expérimentés qui adoptent avec succès les robots. Ils en tirent bénéfice pour superviser plus efficacement les opérations.

En prescrivant des situations de travail particulières, les technologies peuvent ainsi contribuer à transformer l'expérience de travail et freiner, ou accélérer, l'apprentissage des nouveaux apprenants. Dans le cas de l'automatisation de la prise de décisions, l'enjeu réside dans la capacité du salarié à se construire une expérience à partir de laquelle il sera à même d'évaluer les productions du système.

Contrôle et discipline

Enfin, les études faisant état de ces transformations montrent souvent comment elles s'accompagnent de la mise en place de dispositifs de contrôle, aussi bien du travail que des travailleurs. Les systèmes algorithmiques sont largement mis à contribution pour orienter, évaluer et discipliner les salariés (Kellogg, Valentine, et Christin 2020). Des règles peuvent par exemple être instaurées, sous couvert d'un programme « Usine excellente », pour interdire aux salariés de boire du café à leur poste (Carbonell 2020). « Ces règles », explique J. S. Carbonell (2020:127), « […] n'organisent pas directement la production. Qu'elles soient suivies ou non n'a pas de conséquences immédiates sur la productivité, mais elles sont en un sens un baromètre du degré de contrôle managérial du comportement des travailleurs[329]. » De ce point de vue, le contrôle n'est pas toujours un moyen pour une fin (l'amélioration de la qualité du travail réalisé) et peut constituer une fin en soi.

Cette ambition disciplinaire peut être fortuite et résulter de contraintes matérielles liées aux technologies utilisées. Mais elle peut aussi être le résultat de choix délibérés, ce que révèlent nettement les travaux de D. Gaborieau (2012, 2017). Face aux systèmes de commande vocale qui contraignent le parcours des préparateurs de commande, ceux-ci trouvent des moyens astucieux pour contourner le système, comme retenir par cœur les codes alphanumériques énoncés par le système en début de trajet. Ces codes résument en effet l'ensemble des produits à collecter et, en les mémorisant, il devient possible de gagner en autonomie en se soustrayant au parcours prévu par le dispositif. Seulement, lorsque les managers se rendent compte de ces pratiques imprévues, ils font en sorte de les faire supprimer pour réduire cette marge d'action qu'ils peuvent percevoir comme un risque d'erreur. L'enjeu est alors de confiner au maximum les salariés au travail qui leur est prescrit, ce qui a pour conséquence de dégrader les conditions de travail.

Propos du chapitre et plan

Le travail réalisé en salle blanche peut aussi être analysé sous le prisme de la reconfiguration, au travers d'une attention à l'ensemble des enjeux que nous avons relevés. Dans les salles blanches, l'introduction de nouvelles technologies s'est produite de façon continue et progressive, comme nous l'avons déjà

[329] « These rules, or "prescribed disorder", do not organize production directly, and whether they are followed or not has of immediate consequences on productivity, but they are in a way a barometer of the degree of management control over the behavior of workers » (notre traduction).

documenté (**II.**1.b). Bien que la salle blanche soit un univers déjà fortement dense en équipements techniques, il n'empêche que l'intégration de « nouvelles nouvelles technologies » (Howcroft et Taylor 2014) puisse continuer à affecter des routines et des pratiques de travail. Pour s'intéresser à ces dynamiques organisationnelles, nous avons passé trois *shifts* en salle blanche auprès d'une équipe de techniciens qualité travaillant en journée. Malheureusement, nous n'avons pas observé suffisamment de situation d'utilisation du ClassifiMotif pour pouvoir établir des liens explicites entre la conception de ce dispositif, que nous avons largement documentée (**III.**2, **III.**3, **III.**4) et son énaction par les techniciens dans leur travail quotidien. En revanche, nous avons pu observer la façon dont d'autres technologies numériques, et en particulier le CatégoDéfo, qui est également un système d'IA de traitement d'images, étaient intégrées dans le processus d'analyse qualité.

Une grande place sera volontairement laissée au contenu empirique dans ce chapitre, de sorte à renseigner le plus finement possible les modalités du travail de la qualité en salle blanche. Il s'agira de fournir des éléments pour défricher un espace encore assez peu investigué par les SHS, et ainsi contribuer à le caractériser, de sorte à alimenter de futures enquêtes intéressées par la salle blanche et l'industrie du semiconducteur de façon générale. Pour ce faire, nous attacherons de l'importance à évaluer la configuration du travail de technicien qualité en examinant leur travail au plus près de sa réalisation effective. Au travers de la description de changements en cours (introduction de nouveaux dispositifs techniques et / ou organisationnels), nous pourrons évaluer des dynamiques actuelles de reconfiguration, en mettant en évidence, selon des degrés et des modalités diverses, les phénomènes décrits dans la littérature : déplacement de tâches, évolution de l'autonomie individuelle, place laissée à la coopération ou à l'apprentissage.

Au cours de ce chapitre, nous verrons comme le déploiement l'IA s'inscrit précisément dans la reconfiguration du travail qualité opéré dans la salle blanche. Il s'y inscrit sans en être la cause, au sens où il poursuit des trajectoires de numérisation et d'automatisation du travail qui ont largement précédé l'IA. Notre regard portera plus précisément sur les modalités d'adaptation des techniciens du service (1), aussi bien à l'échelle collective qu'à l'échelle individuelle. Nous examinerons les conditions organisationnelles de leur activité qui, nous le verrons, se rapprochent qualitativement de celles qui peuvent peser sur des sites de production (1.a). Forts de ce constat, nous nous intéresserons tout particulièrement à la façon dont les techniciens maintiennent leur autonomie dans le travail (1.b). En tenant compte des modalités d'exercice et d'apprentissage du métier, nous verrons comment cette autonomie se trouve menacée par les transformations envisagées de leur travail, notamment au travers du déploiement de l'IA (1.c).

L'examen de l'hypothèse d'une méconnaissance globale du travail réalisé par les techniciens nous conduira enfin à examiner les dynamiques de coopération et de non-coopération entre la salle blanche est les bureaux (2.a). Nous montrerons comment une mise à distance opérée selon plusieurs dimensions (spatiale, socio-économique, organisationnelle) est à l'origine de cette méconnaissance (2.b).

1. Compétence et autonomie des techniciens qualité au prisme de l'automatisation du travail

Lorsque je pénètre pour la première fois dans la salle blanche après avoir passé plusieurs mois dans les bureaux attenants, mes attentes sont – bien malgré moi – pétries des mains des ingénieurs, qui m'ont dressé un tableau particulier du travail qui y est réalisé. L'impression générale est celle d'un labeur réalisé par de simples exécutants, aux prises avec un travail routinier et rigide, pas toujours très bien fait qui plus est ; l'emphase est régulièrement mise sur la propension aux erreurs qui émane des ateliers. D'autres échos positifs plus rares me sont aussi narrés, comme cet échange par mail fructueux, hors cadre, qui a permis de débloquer une situation gênante. Des anciens techniciens, désormais sortis de la salle blanche grâce à leur expérience, ont aussi parlé de conditions de travail difficiles. J'ai conscience du positionnement situé des enquêtés des bureaux (tout autant que du mien), et vise à ouvrir des yeux nouveaux sur cet environnement qui m'est alors inconnu.

Bien loin de l'image qui m'avait été présentée, le travail de technicien qualité m'est apparu d'une grande complexité. Dans cette section, nous chercherons à rendre compte des pratiques et conditions de travail des techniciens du service Qualité. Nous nous appuierons pour cela sur une analyse en termes de qualification et d'autonomie dans le travail que nous devons d'abord expliciter au travers d'un détour par la sociologie du travail.

Entre compétence et qualification

Le déploiement du numérique et de systèmes automatisés dans l'industrie a pu faire craindre au remplacement des salariés (**I.**2.c). D'autres analyses plus consensuelles, comme celles de D. Autor et D. Dorn (2013), ont plutôt pointé vers un mécanisme de polarisation des emplois (Gallego et Kurer 2022). Ce phénomène rend compte de ce qui pouvait constituer une surprise : la croissance de la part des emplois dits « peu qualifiés », malgré l'automatisation des tâches les plus routinières. La réponse est à trouver dans le déplacement de nombre de ces salariés vers des activités de service. Dans le même temps, les salariés dits hautement qualifiés, outillés par les nouvelles technologies dont ils parviennent à tirer avantage, peuvent maintenir leur emploi.

Qui sont donc ces travailleurs qualifiés, et ceux qui ne le seraient pas ? C. Dubar (1996) pose le débat selon les termes de G. Friedmann (1964) et P. Naville (1956). Il attribue à G. Friedmann une position substantialiste, dans laquelle la qualification est inhérente au savoir et au savoir-faire des salariés. Un travail qualifié est associé à un certain poste de travail, qui mobilise des facultés techniques et intellectuelles particulières et, par suite, un travailleur qualifié est celui qui exerce un tel travail. Chez P. Naville, la qualification est enrichie d'une dimension sociale. Il ne s'agit pas tant de se concentrer sur ce que fait le travailleur, que sur la façon dont il est perçu. En particulier, la formation tient une place importante dans ce qui fait considérer un travail comme qualifié, pas seulement pour les savoirs qu'elle permet d'acquérir, mais aussi vis-à-vis du statut social qu'elle procure. Pour P. Naville, cité par C. Dubar (1996:181), la qualification est ainsi un « rapport social complexe entre les opérations techniques et l'estimation de leur valeur sociale ». Dans les deux cas, le temps de formation

institutionnel (enseignement, stage, formation continue) est ainsi reconnu comme un indicateur de la qualification.

Avec l'évolution des formes de travail, un nouveau modèle de la qualification a émergé (Oiry 2005). Dans sa dimension individuelle, la qualification des salariés ne repose plus tant sur la capacité à effectuer des tâches particulières avec brio, qu'à leur habileté à s'adapter aux situations imprévues. Elle est détachée du poste de travail et de ses tâches prédéterminées, même si elle continue de reposer sur des représentations sociales, en particulier celles qui sont négociées à l'échelle collective par les partenaires sociaux. Cette acception de la qualification, estime E. Oiry, rejoint celle de la compétence, qui se développe à la fin des années 1990. La compétence est envisagée comme un attribut individuel, qui intègre des savoirs non-techniques (relationnels, communicationnels) et qui articule des dimensions individuelles et organisationnelles – au sens où la compétence peut émerger dans un contexte organisationnel qui lui est propice (Oiry 2005). La compétence est également le fait d'un apprentissage, entre expérience pratique et mentorat de pair à pair, qui nécessite des moyens organisationnels et collectifs dédiés.

Risquer la déqualification

Les études concernant le déploiement de nouvelles technologies, dont celles présentées in introduction, montrent comment les tâches peuvent être transformées, déplacées vers de nouveaux groupes professionnels. Dans ce contexte, alors que les relations intra-équipes sont largement médiées, et parfois détériorées, comment chacun des travailleurs peut-il continuer à assurer ce qui dépend de lui ? L'un des éléments clé de la reconfiguration du travail est effectivement celui du maintien des compétences et de l'autonomie des salariés.

Pour de nombreux auteurs, et notamment ceux qui s'inscrivent dans la théorie du procès de travail[330] comme J. S. Carbonell (2022), les conséquences actuelles de l'intégration des nouvelles technologies dans le travail sont essentiellement négatives du point de vue de l'expérience de travail. Outre l'intensification du travail, l'accroissement du contrôle ou la substitution de certains salariés, les travailleurs peuvent être soumis à des dynamiques de déqualification (Carbonell 2022). L'automatisation des tâches se double d'un déplacement et d'une réattribution des responsabilités qui peuvent amener à la perte de compétences et de gestes techniques, devenus « simplifiés et codés » (Carbonell 2022:29). Comme le note cet auteur, les processus d'automatisation peuvent pourtant aboutir à des requalifications. Il prend l'exemple d'activités nouvelles de maintenance et de réparation des machines, qui remplacent le travail sur des postes de production plus répétitifs. Même si la requalification peut être promue par certaines entreprises, elle paraît procéder davantage de l'expression d'une forme d'optimisme que d'un véritable phénomène d'ampleur (Gobena 2024).

Le déploiement de nouvelles technologies est l'occasion de redistribuer les tâches et de prescrire de nouvelles dynamiques entre groupes de salariés. Néanmoins, la prescription formelle du travail, ainsi que le rappelle P. Ughetto (2018b:102), ne suffit pas à déterminer la réalisation effective du travail. Les

[330] La *Labor Process Theory* puise dans les travaux d'H. Braverman (1974), lui-même d'inspiration marxiste, et s'intéresse tout particulièrement au travail du point de vue des travailleurs eux-mêmes en interprétant la relation de travail comme une relation de domination.

salariés parviennent à conserver certaines marges de manœuvre. Cette perspective amène à penser la compétence du point de vue des techniques de travail inventées, conçues par les travailleurs eux-mêmes au sein d'un environnement complexe auquel ils cherchent à s'adapter. De ce point de vue, le travail pourrait être requalifié dans la pratique.

Dans cette section, nous analyserons les modalités d'adaptation des salariés de la salle blanche à la forte numérisation de leur travail. Nous aurons l'occasion, en nous concentrant sur la capacité d'action des techniciens en salle blanche, de décrire finement leur activité (1.a). Nous verrons comment, malgré les contraintes organisationnelles et technologiques qui pèsent sur eux, les techniciens tentent et parviennent à conserver une part d'autonomie par des pratiques d'adaptation vis-à-vis des dispositifs sociotechniques (1.b). La dernière partie montrera comment le service Qualité cherche à restreindre cette autonomie par la procéduralisation du travail en vue de l'automatisation programmée du travail des techniciens (1.c). Nous verrons que l'un des facteurs de cette transformation est la méconnaissance des processus d'apprentissage des techniciens.

1.a. S'inscrire dans la chaîne d'analyse qualité : une activité d'enquête

On accède aux bureaux des techniciens qualité en traversant l'atelier de la qualité, qui fait à peu près la moitié d'un terrain de football. Il regroupe surtout des machines d'inspection (3/4 du parc de la qualité) et de revue (1/4). L'équipe est installée sur la passerelle entre deux bâtiments (d'un côté la qualité, de l'autre la production), dans une sorte d'alcôve, voir (Figure 65). Celle-ci reproduit les schémas classiques de l'*open space* : des ordinateurs étroitement installés les uns à côté des autres, les écrans visibles à chaque instant, dans une certaine promiscuité contrainte par la taille exiguë du lieu. Tout le monde est en combinaison intégrale et les bureaux sont en métal. Lors de notre visite, à l'hiver 2023, il fait particulièrement froid, et le contact des avant-bras sur les tables métalliques est inconfortable. Alors Cécile, l'une des techniciennes les plus expérimentées, est allée chiper des disques roses en plastique qui servent normalement à emballer les plaques de silicium. Elle en positionne un de sorte à boucher partiellement l'aération et les autres sont distribués à qui en veut pour servir de repose-bras.

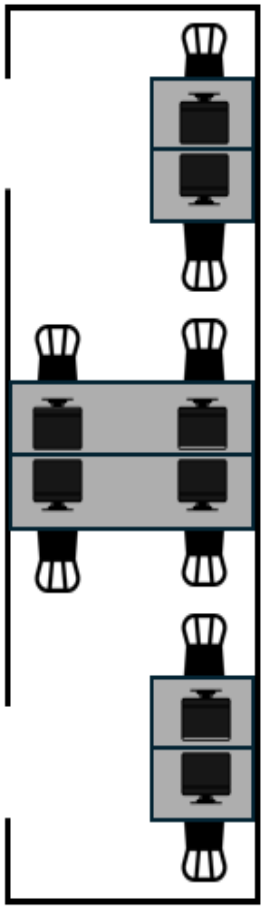


Figure 65 : Schéma de l'alcôve des techniciens qualité, vue du dessus. Elle donne sur la passerelle entre deux bâtiments. Il n'y a pas de porte.

Les techniciens qualité de la salle blanche sont répartis selon plusieurs échelons de qualification ascendants : Tech. 2, Tech. 3, Tech. 4. L'échelon Tech. 1, quant à lui, est réservé aux opérateurs de production, voir (Figure 66). Il existe une certaine mobilité dans l'accès à des échelons supérieurs. Comme l'explique Cécile, « Tu restes pas longtemps Tech. 2 ». Ce statut est en quelque sorte transitoire, les techniciens novices y passent environ six mois avant d'être promus Tech. 3. C'est le temps minimal qu'il faut, selon les techniciens, pour pouvoir être autonomes sur la réalisation des rapports qualité.

D'autres parlent d'un an. L'information est surprenante lorsque l'on imagine avoir à faire à de simples exécutants. Comme on le constatera en pratique, ce n'est pas du tout le cas.

Statut	Rôle au sein de l'atelier qualité	Prénoms (modifiés) des enquêtés rencontrés
Tech. 1	*Non applicable – Réservé à certains opérateurs de production.*	
Tech. 2	Réalisation de rapports d'analyse.	
Tech. 3	Comme Tech. 2 + création de recettes, accès au poste de gestion de la ligne.	Antoine, Julia, Stéphane
Tech. 4	Comme Tech. 3 + demandes d'ancrage, communication privilégiée avec les ateliers.	Alfred, Cécile, Déborah
Manager d'équipe	Supervision du travail, communication privilégiée avec les ateliers et les bureaux.	Mathieu

Figure 66 : Rôles et prénoms (modifié) des enquêtés rencontrés.

Des trajectoires professionnelles variées

L'équipe que nous avons intégrée est l'une des cinq équipes de techniciens qualité de SemiCorp. Toutes ces équipes se relaient, en trois-huit, pour assurer la continuité et la bonne réalisation du contrôle qualité. Chaque semaine, une équipe est du matin (de 5h à 12h45), une autre de l'après-midi (de 12h45 à 20h30). Les week-ends (et parfois les vendredis), une troisième équipe effectue un double *shift* de 5h à 20h30. Les quatrième et cinquième équipes, quant à elles, travaillent de nuit. Si les plannings font tourner les équipes sur différents créneaux, les salariés qui travaillent le jour ne font jamais de créneau la nuit, et vice versa. Malgré tout et même en travaillant en journée, Antoine m'explique que pour être à l'heure les matins, « [il se] lève à 3h30 et c'est dur ».

Bien que l'échantillon des enquêtés soit relativement minimal, il est intéressant d'analyser leur parcours professionnel. Au global, l'équipe est mixte (moitié d'hommes, moitié de femmes) et assez hétérogène sur le plan générationnel. Mis à part le plus fraîchement arrivé, tous travaillent dans l'atelier qualité depuis plus de trois ans.

Deux profils se dégagent. D'un côté, les plus jeunes (vingtaine-trentaine d'années : Julia, Alfred, Déborah) ont fait des études techniques. Ils ont passé le baccalauréat avant de s'engager dans des formations techniques en électronique, en chimie, dans des IUT. De l'autre, les plus âgés (quarantaine-cinquantaine d'années : Antoine, Stéphane, Cécile) sont issus de reconversions professionnelles. Ils ont travaillé dans l'industrie textile et dans des commerces avant d'arriver à SemiCorp. Pour plusieurs d'entre eux, l'industrie du semiconducteur a fourni une opportunité pour rebondir après des périodes de difficulté à trouver un travail. SemiCorp figure parmi les plus gros employeurs de la région. L'entreprise jouit d'une certaine aura, et constitue, pour certains, une valorisation de soi sur le plan professionnel. Julia ne mâche pas ses mots : « quand tu viens d'un milieu de merde, SemiCorp c'est le Graal. »

Si l'échelon Tech. 2 constitue une étape temporaire avant de devenir Tech. 3, il apparaît plus dur de prendre du galon par la suite. Antoine explique « J'ai demandé à être formé mais ils me disent "avec tes diplômes ça va être compliqué". J'ai un peu atteint le plafond de verre. » Malgré son expérience, son manque de formation initiale constitue une barrière à son ascension professionnelle du point de vue de sa hiérarchie.

A chaque échelon vient son lot de tâches particulières. Celle qui est commune à l'ensemble des techniciens est la réalisation des rapports d'analyse qualité. De plus, à partir de l'échelon Tech. 3, et après y avoir été formés (pour quelques heures), les techniciens peuvent créer ce que le service Qualité appelle des recettes[331], ce qui leur confère une certaine autonomie dans le réglage des machines d'inspection et de revue. Les Tech. 3 font également de la gestion de ligne ; il s'agit d'un poste particulier, celui du « ligneur », auquel nous reviendrons. En atteignant l'échelon Tech. 4, les techniciens qualité peuvent réaliser des ancrages[332] et sont en contact avec les ateliers de production, ce qui leur permet d'assurer un suivi des analyses qualité. La plupart du temps, en effet, les techniciens n'ont pas de retour sur les analyses qu'ils réalisent, à moins qu'ils n'aient commis des erreurs conséquentes. Les équipes sont encadrées par des managers, présents en salle, chargés de la supervision du travail d'analyse et de la communication avec les équipes des bureaux.

Un travail de jonglage numérique : collecter l'information, rédiger des rapports

Chaque alerte demande la rédaction d'un rapport qui est ensuite transmis aux « supports » (c'est-à-dire l'équipe Suivi Temps Réel, dans les bureaux). Les rapports, entièrement rédigés par les techniciens, incluent les informations suivantes :

- Les informations d'identification relatives au lot revu (noms du lot, de la machine, du stade de fabrication),
- La raison originelle du contrôle, qui peut être déclenché pour trois raisons : (1) alerte déclenchée par un des dispositifs techniques dédiés (ClassifiMotif par exemple), (2) contrôle forcé (par les ingénieurs des bureaux ou les techniciens, en général pour des examens spécifiques et complémentaires), ou (3) contrôle aléatoire,
- Un résumé descriptif du travail de classification des défauts effectué (*quels sont les défauts majoritaires sur la plaque ? comment sont-ils disposés ?*),
- L'analyse du problème par le technicien,
- Une suggestion de l'origine du problème,
- Des documents supplémentaires sous la forme de captures d'écran, jugées utiles par le technicien qui réalise l'analyse (souvent, représentation des plaques et leurs défauts à différentes échelles, et selon différents appareils de mesure).

Chacun de ces rapports amorce la chaîne d'analyse qualité que nous avions évoquées dans le second chapitre, voir (Figure 31). Le rapport est en quelque sorte l'unité de base du travail des techniciens. Un contrôle (s'il déclenche une alerte) égale une analyse égale un rapport.

---

331 Fabriquer une recette consiste à établir un ensemble de paramètres (par exemple taille de plaque, résolution de l'image) qui indiquent à une machine (d'inspection) comment elle doit appréhender une plaque. Il s'agit en quelque sorte d'un calibrage des machines, qui doit être adapté selon les étapes de fabrication, et les dispositifs à semiconducteurs fabriqués. Normalement, il n'y a plus besoin de retoucher la recette quand elle est bien réalisée : elle sera réutilisée des mois voire des années jusqu'à ce qu'il y ait besoin d'une mise à jour (modification d'un produit, nouvelle machine).

332 Ancrer une plaque consiste à tracer, via un logiciel dédié, des zones de la plaque qui devront être découpées et jetées (*scrapées*) en fin de fabrication. Le but de la manœuvre est d'éviter de jeter une plaque entière lorsqu'un motif de défaut est particulièrement localisé (par exemple une tache). Une fois la plaque ancrée, elle poursuit son processus de fabrication normalement. Les zones ancrées sont simplement ignorées par les appareils de gravure. L'ancrage témoigne d'une centralisation de l'activité de la qualité particulièrement prononcée, puisque quelques clics en qualité ont des effets directs sur les activités de production et de formatage des plaques en aval.

Ce travail de rédaction s'opère à partir du recours à de nombreux logiciels, entre lesquels « faut jongler, y'en a pas mal », dit Déborah en souriant. L'analyse demande ainsi de nombreux allers et retours entre ces logiciels, qui servent respectivement à inscrire le rapport d'analyse à classifier les défauts ; à établir le total de chaque défaut et à en fournir une visualisation ; à suivre l'activité de la salle blanche ; à visualiser des fiches d'aide à l'analyse (les « fiches-expert » dont nous reparlerons) ; à savoir combien de temps chaque plaque est restée à telle machine. En dépit de la centralisation informatisée de la production, la récupération de l'ensemble de ces informations n'est, elle, pas centralisée. Une partie de l'apprentissage des techniciens consiste alors à apprendre à collecter des indices en parcourant l'ensemble de l'univers numérique auquel ils ont accès, au sens des « savoir-où » (de Carvalho et al. 2018). Les « compétences spatiales » (Cholez 2008) mobilisées par les travailleurs ne se réduisent ainsi pas à un espace physique, elles viennent se loger jusque dans l'espace numérique.

Une seconde dimension de cette compétence de recherche d'informations tient dans la rapidité d'exécution. Les techniciens cliquent, font des captures d'écran, copient ici et collent là, à un rythme impressionnant. Alors que je fais remarquer son agilité à Julia, que j'observe naviguer de logiciels en logiciels, elle me répond d'un air un peu résigné : « J'aime pas dire ça mais à un moment, tu deviens un robot. C'est toujours les mêmes procédures, y'a que l'analyse qui change. » Si la rapidité peut être valorisée (surtout dans les cas où le service Qualité fait face à de nombreux contrôles simultanés), elle est aussi le symptôme, pour Julia, d'une automaticité déplaisante de l'activité de travail. La figure du robot, tel que l'a analysée D. Gaborieau (2017) au sein des entrepôts logistique, se signale ici comme un repoussoir. Pourtant, Julia tient à la séquentialité des opérations qu'elle réalise : consulter les raisons du déclenchement, aller voir l'image de la plaque, vérifier si une analyse n'a pas déjà été faite par quelqu'un d'autre. Elle s'y est même conditionnée, de sorte à ne pas faire d'erreur : « J'ai pas intérêt à changer de méthodologie [entre chaque lot] sinon je vais oublier une étape. »

Ce jonglage logiciel, qui témoigne d'une capacité à trouver des informations précieuses pour l'analyse, se double d'un jonglage cognitif entre les activités réalisées. Certaines analyses demandent à lancer des procédures de traitement d'images par des logiciels dédiés, et ces calculs peuvent prendre plusieurs dizaines de secondes. Que faire pendant ce temps ? Lorsque c'est le cas, les techniciens, à l'instar de Julia, un jour où le service Qualité est particulièrement sollicité, peuvent être amenés à embrayer sur un nouveau contrôle, plutôt que d'attendre : « Je peux pas faire deux analyses en même temps. Mais je peux classifier, ça me laisse du temps de cerveau […]. En fait, je fais au plus vite là où j'ai pas à réfléchir et je fais le reste après… mais c'est ma méthode. » D'une certaine façon, Julia ordonne et régule son activité de travail de sorte à pouvoir se concentrer sur la partie d'analyse. Elle est alors plongée dans une « multi-activité » (Bidet et al. 2017), dans laquelle il existe un décalage entre ce que fait le travailleur (par exemple ici, classer des défauts pour un contrôle A) et ce à quoi il se voue sur le plan cognitif (réfléchir à l'analyse qualité d'un contrôle B). Le rapport d'analyse, auquel Julia continue à réfléchir, fait figure de « présence obstinée » (Datchary et Licoppe 2007), qu'elle devra traiter ultérieurement, et qu'elle garde en tête. Assise sur sa chaise, Julia est malgré tout engagée dans ce que la psychopathologie du travail appelle « l'auto-accélération » (Dejours 2016), c'est-à-dire l'accélération ponctuelle des gestes, et plus généralement ici des pratiques de travail, pour satisfaire les objectifs de l'organisation. Soumis à l'urgence, pour travailler plus vite, les techniciens sont ainsi amenés à rompre la séquentialité de leur travail et à se charger simultanément de plusieurs tâches sur le plan cognitif.

Le rapport à l'urgence introduit dans le travail d'analyse découle d'une organisation du travail portée sur la continuité de la production dans une situation de forte incertitude. Les aléas et les périodes de forte production sont autant de raisons pour lesquelles l'atelier pourrait se trouver engorgé. Nos présences sur site se sont étalées sur des journées relativement calmes, et d'autres très chargées. Même si les enquêtés ont toujours pris le temps de répondre à nos questions, nous avons senti des attitudes différentes, plus relâchées et plus joviales lorsque le service est moins sollicité. C'est que l'atelier qualité est aussi soumis à des situations d'urgence différée, comme l'illustre bien Mathieu, le manager : « Ce qu'on apprend vite ici, c'est qu'il y a des moments où on te dit qu'il y a une urgence, tu attends des heures et quand ça arrive tu dois être prêt. » Et même quand la charge de travail est moins intense, l'atelier qualité doit s'attendre à ce que la situation puisse basculer à tout moment. En ce sens, le travail de la qualité s'inscrit dans des contraintes temporelles proches de celles qui sont habituellement remarquées sur des sites de production.

Epistémologie de l'analyse qualité : entre abduction et comparaison

L'analyse qualité repose sur une étape préalable importante : la classification des défauts. Cette étape est essentielle pour guider l'analyse. Par exemple, si à l'issue de la classification des défauts, un technicien relève un nombre important de défauts de type « rayure » sur la plaque, il est possible que son analyse fasse état du calibrage défaillant d'un appareil. Charge ensuite au technicien, en inspectant l'historique des étapes de fabrication de la plaque, de déterminer la machine qui pourrait être concernée.

Donnons-en une autre illustration : au cours de son enquête sur un problème qualité, Antoine se demande si des mesures métrologiques pourraient être responsables des défauts observés. Il consulte alors l'historique de production de son lot et constate que ces mesures ont été effectuées sur les plaques n°9 et 10 seulement[333]. Or, puisque les plaques n°1 et 24 sont également touchées par les défauts, alors qu'elles n'ont pas subi ces mesures métrologiques, ce n'est pas de ce contrôle que vient le problème. Antoine peut alors écarter cette hypothèse. Le travail d'analyse, comme « activité d'enquête » (Thievenaz 2014), mobilise une méthode résolument abductive. A partir de leur expérience, les techniciens font émerger une ou plusieurs hypothèses sur les causes associées aux défauts. On retrouve là une opération de diagnostic quasi médico-légale, comme l'a décrit M. Crawford (2010) pour évoquer le travail de réparation des mobylettes. Plutôt que de mettre les mains dans le cambouis, ce sont leurs yeux que les techniciens qualité font fureter. Leurs hypothèses sont testées sur la base des informations dont ils disposent, jusqu'à ce qu'ils aboutissent à une conclusion satisfaisante qu'ils feront figurer sur le rapport. Pour s'aider en cas de doute, les techniciens s'aident des herbiers de défauts, qui existent pour chaque produit et chaque étape.

Le but du CatégoDéfo, qui a été déployé en amont de l'étude sur certaines machines, est justement d'automatiser la classification de défauts préalable à l'analyse. Pour des raisons d'incompatibilité logicielle[334] cependant, les techniciens continuent à classer une grande partie des défauts *à l'œil*. Ce n'est pas vraiment ce qu'ils préfèrent, la tâche est considérée comme rébarbative et peu épanouissante, il faut régulièrement classer des centaines de défauts avant de pouvoir passer à l'analyse. Pour accélérer cette

[333] Il peut y avoir entre une et vingt-cinq plaques par lot, au sein d'un *foup*.

[334] Les machines utilisées, vendues par des fournisseurs différents, utilisent des infrastructures logicielles qui ne permettent pas toujours d'installer le CatégoDéfo, ou alors pas dans des conditions optimales.

étape pourtant obligatoire, les techniciens font preuve d'une certaine dextérité. Antoine, à la façon d'un pianiste, classifie à l'aide des touches du clavier seulement, en utilisant le pavé numérique pour inscrire le code du défaut présenté à l'écran et les flèches pour passer d'un défaut à classer au suivant. Il a parfois recours à la souris pour zoomer ou pour changer la direction de la luminosité[335].

La comparaison apparaît comme un moteur important de la prise de décision. Pour classer les défauts, Antoine compare la plaque de référence avec la plaque courante. Pour un lot qu'il nous montre en particulier, il a des difficultés à bien cerner les différences : « au premier coup d'œil c'est pas évident ». L'attention visuelle est vivement mobilisée. Julia de son côté, bascule d'une image à l'autre très rapidement pour faire apparaître en négatif l'endroit où se situent les défauts qu'elle cherche à repérer, « et pour pas m'embrouiller dans ma tête je me dis Ref Def Ref Def[336]. » Parfois les différences sont très subtiles. Julia repère même un défaut sur une image supposée être de référence, qui devrait en être vierge.

La place accordée à la comparaison rappelle le caractère crucial de l'apprentissage et des expériences vécues dans le travail des techniciens. Leur capacité à comparer découle de leur capacité à mémoriser des situations précédentes, qu'elles aient eu lieu à quelques secondes d'intervalle (comparer deux plaques) ou quelques semaines (comparer deux situations).

Des techniciens immatriculés et redevables

Chaque technicien dispose d'un matricule, le « trigramme », qui agglomère leurs initiales ainsi qu'un nombre (par exemple LD085). Le matricule a plusieurs utilités : il permet tout à la fois de leur donner accès à des ressources sensibles, de garantir la bonne distribution du travail, mais aussi d'évaluer leur performance au travail. Précisons tout cela.

Le matricule, en combinaison avec le mot de passe, permet d'abord d'accéder aux logiciels. Lorsqu'un technicien a été trop longtemps inactif sur l'un des logiciels, il doit se réidentifier. D'après les estimations des techniciens, ils s'identifient ainsi entre vingt et trente fois par jour, ce qu'ils trouvent particulièrement pénible et ce dont ils se plaignent auprès des ingénieurs, sans qu'une réponse satisfaisante n'ait été apportée au moment de notre étude. Ici, la configuration numérique elle-même crée de la répétitivité dans le travail.

A chaque fois que les techniciens se chargent d'une analyse qualité, ils la sélectionnent au sein d'une liste à laquelle tous peuvent accéder. Ils indiquent leur matricule dans le logiciel, de sorte à montrer aux autres qu'ils se chargent de ce cas, afin d'éviter tout travail redondant. La sélection s'opère au travers d'une priorisation qui intègre de nombreux paramètres. Certains contrôles sont par exemple réservés aux techniciens qui sont réputés pour être spécialistes de problèmes spécifiques, qu'ils connaissent bien. Dans des situations de surcharge de l'atelier qualité, le manager peut aussi encourager les techniciens à s'occuper de cas rapides à traiter (souvent des cas de recontrôle de lots déjà passés dans le service et

[335] L'imagerie réalisée par les microscopes électroniques à balayage permet de capturer des images vues avec différents angles de projections de photos. La technique s'avère particulièrement utile pour distinguer des trous de bosses, grâce au repérage de la projection des ombres.

[336] « Ref » au sens de la plaque de référence, et « Def » celle qui est défectueuse. En répétant ces mots en même temps qu'elle affiche une image puis l'autre, Julia s'assure de bien repérer les défauts sur la plaque défectueuse.

qui ont subi un examen supplémentaire), de sorte à désengorger le service en libérant des machines d'inspection. La sélection peut aussi être négociée informellement, à haute voix, par les techniciens, ou plus formellement lors du brief de début de *shift*. La répartition des tâches repose ainsi sur une dynamique collective d'attribution du travail, où chacun dispose d'une certaine marge dans le choix de sa tâche. Cette marge est cependant soumise à une forme d'aléatoire, il n'est pas possible de connaître à l'avance de quoi l'analyse sera faite.

Lorsqu'un technicien indique son matricule, il s'engage tacitement à traiter l'analyse jusqu'au bout, même s'il peut bien sûr faire appel à un ou plusieurs collègues pour le conseiller. En général, les analyses ne sont pas laissées en suspens. L'inscription du trigramme atteste ainsi d'une certaine responsabilité que prend le technicien vis-à-vis du cas qu'il traite. Il en devient référent, et surtout redevable. Il pourra être recontacté ultérieurement par l'équipe Suivi Temps Réel pour préciser ou expliciter son analyse. Comme il n'est pas aisé de se rappeler de tous les cas traités chaque jour, les techniciens adoptent des techniques de mémorisation externalisées[337]. Julia par exemple note les lots qu'elle traite sur son carnet papier, ainsi que quelques informations liées à ce lot. Cela lui permet de se souvenir de chaque cas qu'elle traite, attendu qu'elle peut être questionnée à ce sujet jusqu'à deux semaines plus tard : « On va te dire "pourquoi tu as fait ça ?" et tu sais plus en fait. » La capacité à répondre à des sollicitations impromptues, dans l'atelier qualité comme lors du tournage de films (Rot 2014), repose sur un travail d'inscription qui permet de « sauver des coups » pour les collègues et, plus largement, pour l'organisation.

Quand l'évalué est l'expert

L'inscription du trigramme sert aussi à évaluer les techniciens qualité. Chacune des analyses est en effet validée par le manager d'équipe, qui appose systématiquement une appréciation. Historiquement, trois mentions pouvaient être attribuées : *Pas de Changement*, *Changement Mineur* (par exemple si le technicien aurait dû demander un examen supplémentaire mais ne l'a pas fait), ou encore *Changement Majeur (*des plaques défectueuses ont été relâchées dans le flux de production).

Suite à des protestations antérieures à l'étude, la catégorisation des mentions a été revue, ainsi que l'explique Julia : « Y'a des gens qui ont pas apprécié… au travail, qu'on les note. Alors ils ont refait le système. » Ce nouveau système inclut toujours trois niveaux : *Beau Travail*, *Feedback*, *Attention*. Il s'agit essentiellement d'un changement de nom vis-à-vis de l'échelle précédente, avec une tonalité qui se veut plus positive et constructive. La fonction de la notation reste la même : évaluer les salariés et les pousser à s'améliorer, en considérant leurs analyses comme des activités purement individuelles. Les techniciens subissent en effet des injonctions explicites à la prise de responsabilité, qu'ils finissent par intérioriser. Alors qu'elle rédige son rapport d'analyse, Julia écrit « *probablement* » dans une phrase, puis l'efface après relecture. Sans que je n'aie rien dit, elle se justifie auprès de moi : « Nan je vais pas écrire "probablement", je suis Tech. 3. […] Mon ancien chef me disait "Essaie d'être sûre de toi." »

Le rôle du manager de proximité, dans ce contexte, consiste aussi bien à orienter l'activité d'investigation qu'à l'évaluer. Ce positionnement de surplomb amène le manager à pouvoir apprécier le travail réalisé

[337] Au tournant des années 1990, le tournant pragmatique de la sociologie du travail a intégré de façon croissante ces phénomènes de « cognitivité distribuée » dans l'analyse de l'activité de travail (Licoppe 2008) (cité par (Ughetto 2018a:20)).

dans l'équipe des techniciens. Mathieu se montre particulièrement admiratif des techniciens qu'il supervise : « Ce qui est pas évident c'est les analyses. Il faut un savoir, c'est impressionnant. » Il prend pour exemple l'un des membres de l'équipe, qu'il trouve particulièrement érudit : « C'est une Bible ! »

Face aux capacités techniques des techniciens, et alors qu'il a été recruté en externe sans avoir gravi les échelons, Mathieu se trouve un peu embarrassé : « J'ai regretté de pas avoir passé six mois avant, à faire comme eux. Là je te mets [à Stéphane] des "*Beau travail*"… » Il fait ensuite la moue sans conclure sa phrase (comme pour dire « mais je n'en sais pas beaucoup plus que toi »). Mathieu reconnaît la difficulté et le paradoxe de l'évaluation des contenus qui relèvent d'une expertise technique qu'il n'a pas totalement intégrée lui-même. Il estime contrôler plutôt la cohérence logique des analyses que leur contenu, comme il l'explique ensuite à Stéphane : « Là cet aprèm je regarde tes analyses, je prends mon temps […]. Moi je suis ta ligne, si tu t'es trompé de ligne bah… » Il hausse ensuite les épaules, pour signifier qu'il ne pourra pas y faire grand-chose.

Cette situation assez insolite, que nous ne nous attendions pas à observer, témoigne d'une reconnaissance de l'expertise des techniciens qualité par les managers de la salle blanche, qui travaillent à leur contact. Ils déploient en effet un ensemble de compétences techniques et organisationnelles variées : recherche d'informations, rédaction de rapports, raisonnements logiques, priorisation de l'activité. Au contact du travail quotidien des techniciens, leur manager reconnaît l'ensemble de ces dispositions, acquises par la pratique collective et individuelle. Cette appréciation, qui paraît participer d'une bonne ambiance dans l'équipe des techniciens, semble pourtant se cantonner à la salle blanche.

1.b. Maintenir son autonomie dans un univers numérisé

L'environnement de la salle blanche dans lequel se meuvent les techniciens est largement numérisé. Les dispositifs technologiques utilisés produisent aussi bien des médiations avec le réel, des moyens de communication ou de perception du monde, que des mouvements et des injonctions. Ces instruments participent en cela à cadrer comme à rationaliser l'activité de travail. Dans cette sous-section, nous souhaitons mettre en perspective les pratiques et comportements d'adaptation des techniciens au sein de cet écosystème. Nous les interpréterons au prisme de l'autonomie des salariés, c'est-à-dire, pour reprendre la définition de P. Ughetto (2004:191), « de la part que les salariés parviennent à soustraire à la volonté rationalisatrice de l'entreprise, autrement dit la part du social qui parvient à ne pas subir l'emprise de la rationalité économique des gestionnaires. » La liberté d'action se manifeste notamment dans le non-recours aux artéfacts technologiques dont l'utilisation est prescrite par l'organisation du travail. Elle peut être prolongée dans des usages où les salariés restent critiques des injonctions qui leur sont faites, notamment celles qui émanent des systèmes d'IA.

Corriger les erreurs des machines

L'existence même du service Qualité vise à gérer des situations imprévues : si tout fonctionnait selon les prérogatives de l'organisation, aucune plaque ne serait défectueuse. L'objectif est de parer à ces incertitudes. Celles-ci peuvent être d'origine et d'intensité variées. Pendant notre étude, les enquêtés nous racontent de nombreuses anecdotes, parfois sur le ton de la catastrophe : une coupure de courant paralyse l'ensemble du site et fait perdre des mois de travail aux services de recherche et développement, dont les plaques expérimentales devaient être conservées à des températures spécifiques ; un problème qualité mal interprété gâche plusieurs jours de production émanant d'une machine défectueuse non identifiée.

L'un des facteurs d'incertitude concerne les aléas liés aux machines, qu'il s'agisse de celles qui (1) permettent de fabriquer ou de celles qui (2) permettent de transporter ou d'analyser les plaques. Les techniciens qualité, par leurs rapports, cherchent généralement à résoudre les problèmes liés aux premières. Lorsqu'ils prennent le poste de « ligneur », ils s'occupent plutôt de surveiller les secondes.

Le ligneur est posté directement dans l'atelier qualité, à l'écart de l'alcôve, pour un *shift* entier. Il est seulement remplacé brièvement par un collègue lorsqu'il prend sa pause pour aller manger. Même s'il est isolé du reste de l'équipe des techniciens qualité qui viennent le voir épisodiquement – parce qu'ils vont aux toilettes, en pause, ou qu'ils ont une demande particulière –, le ligneur est au cœur de l'atelier qualité et de ses autres occupants. Opérateurs de production, ingénieurs de passage, techniciens de maintenance ou visiteurs accompagnés passent nécessairement devant lui. Son bureau est fait du même métal que dans l'alcôve, avec un ordinateur installé dessuis. Antoine nous laisse le suivre toute une journée. Il dispose de sa propre souris, une souris ergonomique, car il a développé des troubles musculo-squelettiques au bras. « Les semaines de cinq jours[338] ça me tue », souffle-t-il. Ces conséquences du travail en salle blanche ont bien été identifiées par la littérature en ergonomie (Wong et Richardson 2010).

[338] Les techniciens qualité (qui travaillent en semaine et en journée) alternent des semaines de quatre jours et des semaines de cinq jours.

Il faut être Tech. 3 et avoir suivi une brève formation pour pouvoir gérer la ligne. L'objectif de ce poste est de fluidifier les processus d'inspection et de revue des lots passant dans l'atelier qualité. La majorité des lots sont affectés automatiquement aux machines qui réalisent les prises d'images. Cependant, des demandes de contrôles sont régulièrement diligentées manuellement, depuis les bureaux comme depuis la salle. Tout le jeu est alors de parvenir à prioriser les contrôles en s'assurant que (1) les contrôles les plus urgents sont bien réalisés et que (2) l'atelier qualité ne se trouve pas engorgé par un surplus de lots en attente.

Antoine observe par exemple un lot dans une situation étrange : il a été retenu automatiquement à l'étape d'entrée dans la machine d'inspection, avant même la prise d'image. Cette situation relève de la bizarrerie : en principe, c'est au terme de l'inspection qu'un lot peut (ou non) être retenu, pas avant. Antoine vérifie qu'il n'y a pas de résultats d'inspection, et en effet, aucune image n'a été capturée. Il en conclut que la mesure n'a pas été faite. Pour éviter que le lot ne continue sa route sans avoir été inspecté, Antoine annule les étapes de fabrication suivantes et fait en sorte que le lot repasse par une phase d'inspection. La gestion des bugs et des dysfonctionnements fait partie intégrante du poste de ligneur, qui est garant de la surveillance de l'automatisation[339].

Délaisser les technologies numériques centralisées

Face aux contraintes associées aux technologies rattachées à la production, les salariés éprouvent souvent une certaine frustration. La lenteur des logiciels est régulièrement pointée du doigt. Même lorsque les dispositifs sociotechniques fonctionnent, les techniciens peuvent être amenés à les contourner pour se faciliter le travail.

Ce midi-là, la prise de poste d'Antoine comme ligneur est, comme à chaque fois, une opération délicate. Elle demande à prendre connaissance de la situation présente dans toute sa complexité, au beau milieu de la journée, alors qu'il « relève » sa collègue, un temps crucial déjà décrit par G. Rot et F. Vatin (2017:57). Afin de se mettre à jour, Antoine échange brièvement sur la situation présente avec sa collègue ligneuse, qui termine sa journée (*quels lots sont-ils prioritaires ? quelles prises d'images ont-elles échoué et doivent-elles être relancées ?*). Le logiciel de gestion de la production lui permet de visualiser les contrôles à venir, et ceux qui sont demandés par des ingénieurs et des techniciens.

Pendant les deux premières heures pourtant, Antoine passe une grande partie de son temps au téléphone avec différents collègues du site. Ce sont eux qui l'appellent. Les appels permettent de donner plus d'informations que ce que les emails et logiciels seuls semblent capables de transmettre. Les interlocuteurs décrochent le combiné pour (1) justifier d'un événement inhabituel, (2) alerter sur un problème, (3) expliquer un état de fait particulier, ou encore (4) encourager à la vigilance sur un lot ou une machine spécifique. Appeler participe à interrompre le travail (Datchary 2011), en esquivant les canaux de communication qui ne procèdent pas d'une réponse immédiate (messagerie en ligne, logiciel de gestion de la production) – ceux-ci sont jugés insuffisants. Les appels comblent en un sens la faiblesse communicationnelle des outils numériques, de sorte à s'assurer de la bonne transmission d'informations. Pourquoi ne pas simplement envoyer un email, dans ce contexte ? Pour esquisser une piste de réponse,

[339] On retrouve là l'un des arguments de J. Ellul (1990:77) qui considère que les limites matérielles et pratiques inhérentes aux techniques demandent à déployer l'ingéniosité des travailleurs de façon systématique.

il faut s'interroger sur les modes de communication de SemiCorp. Les enquêtés font état d'une surabondance de mails, qui rend difficile la hiérarchisation des tâches, surtout dans l'urgence. L'un des points forts du mail, à savoir son caractère « asynchrone[340] » (Denis et Assadi 2005), devient un point faible dans des situations critiques. L'ambivalence a été noté par J. Denis et H. Assadi (2005:137) dans leur enquête sur le courriel, tout à la fois « outil d'efficacité communicationnelle et […] ingrédient central de la surcharge informationnelle ». La situation s'illustre un matin, alors qu'un nouvel arrivant est formé dans le service Qualité, et que son collègue s'entend demander : « Tu peux me dire quels mails sont importants ? J'en reçois tellement[341]. » Dans ce contexte, téléphoner devient l'assurance d'une demande bien traitée. Paradoxalement, la fluidité industrielle est rendue dépendante d'interruptions multiples du travail.

De façon générale, dans cet espace empli d'objets de haute-technologie, nous constatons que le papier et le crayon restent des outils indispensables pour les techniciens, comme l'ont déjà noté M. Lewkowicz et R. Liron (2019). Ils servent aux techniciens à (1) prendre des notes sur les actions effectuées, dans le cas où on leur demanderait de se justifier plus tard pour une analyse particulière, à (2) se souvenir d'éléments importants pour la journée ou l'heure à venir, à (3) consigner leurs interactions au téléphone, ou encore à (4) servir de presse-papier physique lorsque les fonctionnalités de copier-coller sont indisponibles sur certains logiciels. Papier et crayon permettent de sauvegarder l'information de façon plus flexible quand celle-ci est suffisamment succincte.

Subvertir les catégories prescrites dans l'usage des logiciels

Même lorsqu'ils utilisent les logiciels prescrits pour réaliser leur travail, les techniciens ne manquent pas d'inventivité pour subvertir leur usage, sur le mode de l'appropriation. En voilà un exemple : le logiciel qui permet de rédiger les rapports se présente sous la forme d'un formulaire. Un encadré texte est dédié à la rédaction de l'analyse proprement dite. Problème : le fait que le texte soit isolé force l'analyse à être purement verbale. Cela rend difficile de produire une description détaillée du problème, d'autant plus lorsque celui-ci concerne des détails complexes à énoncer textuellement. Une image vaudrait mille mots ! Pour rendre son compte-rendu plus compréhensible et éviter les confusions, Julia réalise alors un diaporama. Elle y adjoint des images, entoure et colore certaines zones de sorte à expliciter son raisonnement. La fonctionnalité des pièces jointes, normalement dédiée à l'ajout d'images seules, est ici détournée pour être substituée à l'analyse. De cette façon, les techniciens s'arrangent pour produire une analyse plus fine et plus détaillée, qui est plus facile à comprendre mais aussi à reprendre par les collègues lors de futurs contrôles d'un même lot. Les ingénieurs encouragement informellement cette pratique du PowerPoint complémentaire, même si les instructions formelles diffèrent dans le temps concernant la bonne pratique à adopter, ce qui a pu susciter des critiques de la part des techniciens.

D'autres pratiques d'appropriation des techniciens visent à auto-optimiser la charge cognitive qui pèse sur eux. Alors qu'elle classifie des défauts, Julia visualise huit images simultanément comme le permet le logiciel. Elle clique sur les images qui appartiennent à la même catégorie de défaut, leur attribue le nombre-code correspondant, ce qui les fait disparaître. D'autres images viennent compléter les vides laissés par les images classées. Elle répète l'opération jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de défauts particuliers

[340] Les courriels peuvent être lus sans perturber le destinataire (à moins qu'ils ne génèrent des notifications).
[341] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en septembre 2022.

à classer. Julia m'explique que pour aller plus vite, elle commence par ne classer que ce qui relève de l'évidence pour elle. Le reste est entreposé temporairement dans la catégorie de défauts « divers ». Julia ajoute : « Tout ce qui est un peu chelou je mets *là-dedans* et je reviens après. » Par « *là-dedans* », elle désigne la catégorie « divers », qu'elle vient consulter après un premier passage. Elle utilise cette classe comme un espace de stockage des cas plus litigieux, ce qui lui permet de gagner du temps par ailleurs car elle sait qu'elle pourra y revenir plus tard.

Les techniciens régulent et ordonnent ainsi leur activité de travail de sorte à gagner du temps mais aussi en confort de travail, dans un environnement contraint temporellement et matériellement. Une forte pression pèse sur eux et cette autonomie vis-à-vis du cadre prescrit du travail reste toute relative. La tendance du déploiement des technologies de l'*Industrie 4.0* est plutôt à la standardisation et au contrôle du travail (Butollo, Jürgens, et Krzywdzinski 2019). C'est dans ce contexte que les techniciens tentent, par petites touches, dans des interstices étroits (physiques ou numériques) de reconfigurer leur propre activité de travail, à l'échelle individuelle.

Renier l'expression numérique du doute

Ce maintien de l'autonomie se prolonge aussi dans la posture que tiennent les techniciens face aux systèmes de classification qu'ils utilisent, et face auxquels ils restent critiques.

Le travail normatif de l'équipe IA, que nous avons décrit (**III.**4), s'accompagne d'un travail normatif parallèle, entrepris par les techniciens qualité. Ils évaluent la fiabilité des différentes versions du CatégoDéfo[342] et adaptent leur comportement en fonction de cette appréciation. Il y a ainsi, de leur point de vue, des bons modèles et des mauvais modèles d'IA. L'un de ces modèles, assure Julia, « est le meilleur. Il classifie 99 % des défauts et il fait pas d'erreur. » En pratique, elle ne revérifie que très peu ses résultats, qu'elle tient pour acquis. Au contraire, le modèle qui est considéré comme « le pire » n'est pas tant celui qui fait plus d'erreurs que celui qui « te laisse beaucoup de défauts à classifier, parfois jusqu'à 500. »

Ce qui pose problème aux techniciens, c'est la reclassification manuelle d'une grande quantité de défauts. Ils doivent alors annoter un à un les défauts de la plaque concernée. Ces classifications manuelles sont le résultat d'une marge d'indécision implémentée dans le système qui est alors en mesure (grâce à des critères mathématiques) de refuser de classifier. L'effort cognitif à fournir n'est pas le même lorsqu'une proposition a été faite par le CatégoDéfo, que lorsqu'il faut partir d'une table rase, de la même manière qu'écrire cette thèse ou l'amender ne me demandent pas le même niveau d'effort.

Il apparaît ainsi que les techniciens apprécient qu'une partie du travail soit automatisée. L'activité partiellement automatisée ici, la classification des défauts, est vue comme un obstacle, un préalable à la poursuite des analyses qui représentent pour eux le cœur du travail. Ces résultats viennent mettre en relief les conclusions de L. Vuarin et V. Steyer (2025) sur l'importance du doute machinique[343] pour outiller

[342] Il existe plusieurs versions du CatégoDéfo selon les machines de revue utilisées, qui sont fabriqués par des constructeurs différents, mis en concurrence au sein de la salle blanche.

[343] C'est-à-dire la capacité d'un système sociotechnique à faire apparaître ses marges d'incertitude auprès de son utilisateur. Par exemple, un GPS qui expliciterait son incapacité à joindre les satellites les plus proches et donc à faire connaître sa position exacte.

la réflexion des « humains dans la boucle » de système d'IA. Certes, la communication d'incertitudes techniques par un système peut permettre d'éclairer la prise de décision dans des cas de grande importance. Pour autant, l'injonction à la vérification peut être perçu comme une contrainte lorsqu'elle est redondante et constitue un ralentissement de l'activité. Pour le dire autrement, trop d'occurrences du doute tuerait l'intérêt du doute.

Mais la problématique rencontrée par les techniciens réside-t-elle véritablement dans cette demande de vérification, ou bien dans la nature même de la tâche à vérifier ? Dans une certaine mesure, c'est le ralentissement d'une tâche déjà vécue comme pénible qui entraîne le rejet de ces mécanismes de protection qui visent à rendre l'organisation « antifragile » (Godé, Lebraty, et Barbaroux 2023) (cités par (Vuarin et Steyer 2025)), en lui permettant de faire face à des phénomènes imprévus. La pression temporelle conjuguée au désintérêt pour la tâche réalisée conduisent, en ce sens, à l'indésirabilité de mécanismes de suspension du jugement supposés protéger les flux de production.

Intégrer et critiquer les résultats du système d'IA

Nos observations font état d'une véritable réflexion autour du traitement des résultats de systèmes d'IA. Confrontés à des situations d'ambiguïté, les techniciens doivent parfois trancher des situations épistémiquement épineuses. Lorsque c'est le cas, ils hiérarchisent leurs décisions en tenant compte des objectifs de l'organisation. Antoine visualise une image qui présente (1) un résidu qui a généré (2) un problème d'épitaxie[344]. Il y a donc deux défauts à la fois sur l'image : comment choisir ? Antoine sélectionne *épitaxie* en argumentant qu'il est « le plus important pour lui. » Du point de vue d'Antoine, comme agent du service Qualité, ce problème est considéré comme plus grave, du moins plus significatif, par le collectif. Il ne s'agit plus, dans ce cas de figure, d'évaluer la correction du CatégoDéfo, mais de réinscrire la classification du défaut dans la chaîne d'analyse et dans la résolution de problème. Les résultats ne sont pas pris pour argent comptant et constituent seulement une étape du processus de décision, comme l'ont noté G. Anichini et B. Geffroy (2021) pour les dispositifs d'IA utilisés en radiologie.

De façon générale en effet, les techniciens qualité – du moins ceux que nous avons rencontrés, expérimentés – conservent largement leur esprit critique face aux systèmes de classification, qu'ils n'hésitent pas à contredire. Julia nous montre les résultats du ClassifiMotif, qu'elle analyse avec recul, et pointe du doigt une image : « Il dit "trait", moi je le vois pas. » Elle en désigne une autre « *Là*, "lumino-répétition"… ça doit être à cause de *ça* et peut-être *ça*. » Julia exhibe alors une analyse faite précédemment pour donner un exemple : « Du vrai "lumino-répétition" c'est *ça*. ». Elle conclut en revenant à l'image précédente : « *Là* c'est du "normal". » Julia exprime des désaccords avec les propositions du système et garde confiance en son jugement. Que Julia ait tort ou raison face au système, dans le cadre catégoriel qui a été implémenté par l'équipe IA, la confrontation avec le système lui permet de donner du sens aux productions du dispositif, et de conscientiser son raisonnement. Les résultats du ClassifiMotif font l'objet d'un regard critique de la part des techniciens expérimentés.

[344] L'épitaxie est un phénomène de formation de cristaux, orientés selon sur une direction particulière à partir d'un substrat. La particule indésirée, en l'occurrence, peut gêner la bonne réalisation de l'épitaxie.

Système moyen, bon outil ?

Paradoxalement peut-être, du point de vue du maintien des compétences, il apparaît pertinent de traiter avec un dispositif qui ne soit pas totalement optimisé, et dont les réponses seraient régulièrement incorrectes. D'une certaine façon, l'inadéquation des réponses apportées par le système vis-à-vis des attentes des techniciens marque l'occasion pour eux de continuer à s'exercer et de conserver leur expertise. Une telle implémentation de systèmes incorrects *by design*[345] est-elle pour autant désirable ? Cela n'est pas certain tant que l'objectif de ces dispositifs est d'augmenter la cadence du travail. Systématiser l'erreur pour la rendre fructueuse sur le plan du maintien de l'autonomie de jugement est relativement incompatible avec des objectifs de capacité productive croissante. Il n'est pas certain, en outre, que la réception soit positive du côté de salariés peu expérimentés, qui pourraient se trouver démunis face aux résultats de dispositifs dont ils ne sauraient initialement juger de la fiabilité.

On voit en tous cas s'esquisser une voie différente de celles du remplacement ou de l'assistance des salariés par l'IA, telles que les promesses de l'IA pour le travail avaient pu les formuler (**I.**2.c). En pratique, les salariés confrontés à des résultats algorithmiques sont toujours tenus pour responsables de la qualité de leur travail. Ils ne peuvent pas se contenter d'accepter des résultats de la part de systèmes qu'ils ne jugent pas fiables. Lorsque cette absence de fiabilité est actée par les utilisateurs, elle ne permet pas une substitution pleine des tâches. Il ne s'agit pas non plus d'une assistance, puisque le système se trompe régulièrement. Le système de classification, comme source d'information considérée non totalement fiable, demande à formuler des raisonnements nouveaux par les techniciens. La nouveauté ne réside pas tant dans les résultats à établir – il s'agit toujours de classer les défauts / motifs – que dans la façon d'appréhender ces informations. Du point de vue de salariés en charge de prendre des décisions, la relative nouveauté des systèmes d'IA vis-à-vis des systèmes précédents tient avant tout à la nature probabiliste et injonctive des dispositifs. Il leur faut désormais composer avec des suggestions, potentiellement erronées, qui leur sont faites sur la classification des défauts / motifs.

Un argument se dessine alors en creux : les systèmes de pur diagnostic (au sens d'une classification ou d'une prédiction probabiliste) paraissent relativement inappropriés dans des situations de travail où l'activité partiellement automatisée est centrale, d'autant plus lorsque les salariés sont redevables des résultats de cette activité. En se contentant de simuler le résultat de la réflexion, ces dispositifs n'outillent pas véritablement leurs utilisateurs.

[345] Nous faisons ici une référence (un peu malicieuse) au concept de l'éthique *by design*, approfondi dans les travaux de F. Fischer (2019).

1.c. Entre apprentissage et procédurisation du travail de technicien : faire les frais de l'automatisation

Quel futur pour le travail des techniciens qualité dans le contexte de l'introduction de l'IA ? C'est à cette question que nous tenterons de répondre ici, en montrant le décalage entre les méthodes d'apprentissage actuelles du métier, et la façon dont ces transformations sont envisagées et mises en œuvre par le service Qualité.

L'apprentissage technique du métier de technicien qualité par le développement d'une compréhension physique de la fabrication

L'une des compétences identifiées dans le travail des techniciens qualité est celle de la compréhension physique des processus de fabrication. Nous avons abordé ce thème du point de vue technique, à grands traits, en insistant sur la complexité des phénomènes en jeu (**II.**1). Cette compréhension apparaît comme un facteur clé dans la capacité à réaliser des analyses qualité. L'apprentissage est conséquent compte tenu des milliers de cas de défectivité possibles. Selon les étapes de fabrication, les machines et les technologies concernées, des défauts différents peuvent apparaître. Différents vecteurs d'apprentissage sont recensés dans nos échanges avec les techniciens qualité : (1) le mentorat auprès de techniciens plus expérimentés, (2) la confrontation pratique avec le travail, et (3) les formations données en interne.

Une partie de la formation passe traditionnellement par le mentorat. Les nouveaux venus observent leurs collègues expérimentés et reproduisent les mêmes raisonnements. Au sein des organisations, l'apprentissage est avant tout une activité sociale (Bailey et Barley 2011). Les techniciens doivent ainsi s'inscrire dans un processus de socialisation qui constitue le préalable à l'apprentissage des savoirs professionnels (Korte 2009). La proximité des techniciens au sein de l'alcôve permet facilement à chacun de se déplacer à l'appel d'un collègue qui douterait de la façon d'aborder un contrôle, ou de la solution à apporter. Nous observons essentiellement des situations où le technicien mobilisé transmet des informations, ou vient collaborer à l'élaboration de la solution.

L'apprentissage comporte également une dimension inconsciente, il s'opère sans que les techniciens n'y prennent garde, au fur et à mesure de leur confrontation à l'activité de travail. A propos des nombres-codes correspondant aux différents types de défauts, Antoine glisse : « Tu les apprends pas, tu les retiens. » Les savoirs théoriques sont ainsi intégrés, en partie, par la pratique, à force d'une confrontation continue. Le phénomène est d'autant plus renforcé pour les cas difficiles, dont la résolution a pris du temps et de la réflexion. Stéphane réalise ainsi qu'il est plus efficace dans les situations qu'ils l'ont mis en difficulté par le passé : « Maintenant que j'ai cherché un moment une fois, je m'en rappelle. » Mathieu surenchérit : « Parfois il y a un truc comme ça qui te marque et tu t'en souviens. » C'est au travers des difficultés rencontrées dans de précédentes investigations que les techniciens ancrent leurs savoirs. Comme l'a relevé J. Orr (1986), ces anecdotes et « récits de guerre » (*war stories*) sont des instruments narratifs au service des capacités collectives de diagnostic. Elles permettent non seulement de se rappeler soi-même, mais plus encore de transmettre l'information aux collègues afin qu'ils la mémorisent.

Ceux qui détiennent ces savoirs et qui parviennent le mieux à les mobiliser se voient valorisés par le groupe. L'un des techniciens parle d'un autre en ces termes : « C'est une machine, on l'appelle l'OVNI, il

abat il abat, il te lance une recette, il fait plusieurs analyses en même temps. Il est très calé sur les process. » La compréhension des phénomènes physiques en jeu est corrélée à la rapidité d'exécution et donc à la productivité. Dans ce contexte, posséder de solides connaissances permet de faire l'objet d'admiration, non pas seulement dans la contribution individuelle au travail (produire de bonnes analyses) mais aussi dans la participation au succès collectif (aider les autres à produire de bonnes analyses). Au bout du compte, les techniciens qualité signent leur analyse de leur trigramme, quelle que soit l'aide apportée par les autres. Aider, sachant que cette aide n'est pas mentionnée dans le logiciel, apparaît alors comme un don gracieux invisible à l'organisation (et aux ingénieurs des bureaux) mais très apprécié des collègues en salle.

Des formations sont aussi dispensées en interne pour mieux comprendre les processus de fabrication. Elles sont facultatives pour la majorité du personnel de SemiCorp, mais obligatoires pour ceux qui travaillent dans le service Qualité. « C'est quasi essentiel », estime Julia. Par cette mise à disposition de contenu de formation, l'entreprise reconnaît la nécessité d'une compréhension des procédés de fabrication. Ces formations permettent de véhiculer des représentations précises et uniformisées. Julia commente la façon dont elle a compris ce qu'était une gravure : « Au tout début je pensais que c'était mécanique, "gravure" je voyais un stylo. Mais pas du tout. » Ces formations peuvent prendre la forme de webinaires qui « perme[ttent] d'aller plus loin dans l'analyse », de franchir le cap de « la suspicion », en bref « d'être plus expert ». Pour Julia, ces formations représentent un véritable gain en compétence. Elles nourrissent les investigations en permettant de donner du sens aux images visualisées par les techniciens.

Le maintien de l'autonomie que nous avons décrit (**IV.**1.b) implique que les techniciens qualité se sont autonomisés durant leur apprentissage du travail. Ils ont appris à réaliser des analyses par eux-mêmes, grâce à leur expérience pratique, à leurs collègues, et aux contenus théoriques apportés par l'entreprise. Malgré tout, et pour le dire de façon un peu absconse, il est nécessaire d'être autonome pour conserver son autonomie. Qu'en est-il alors des nouveaux apprenants ? Nous n'avons malheureusement pas eu l'occasion d'en rencontrer, mais les autres techniciens se montrent critiques des nouveaux mécanismes d'apprentissage mis en place, qui visent à se substituer au moins partiellement aux pratiques habituelles : les procédures d'analyse.

Une ressource pédagogique et collaborative : les fiches-expert

Les procédures d'analyse viennent compléter les fiches-expert, un autre outil déterminant pour le travail d'analyse réalisé par les techniciens. Nous en présentons rapidement la teneur pour contextualiser les critiques formulées par les techniciens.

Les fiches-expert se présentent sous la forme de document PDF qui visent à aiguiller les techniciens et les assister dans l'analyse, voir (Figure 67 & Figure 68). Elles sont rédigées et mises à jour par l'équipe Suivi Temps Réel, qui travaille depuis les bureaux.

Plusieurs encadrés composent ces fiches. A côté du titre, la fiche est identifiée par un numéro, sa date de mise à jour, le matricule de l'ingénieur qui l'a rédigée et des informations relatives aux produits concernés. Le recto de la fiche présente des cas typiques du problème décrit. Il sert avant tout à permettre aux techniciens de bien identifier la situation à laquelle ils sont confrontés. En dessous d'images (de

plaques comme de défauts) qui servent d'exemples, des brèves descriptions expliquent quels sont les éléments caractéristiques de la situation rencontrée : distribution des défauts, motif. Les exemples sont également spécifiés de sorte à monter en généralité.

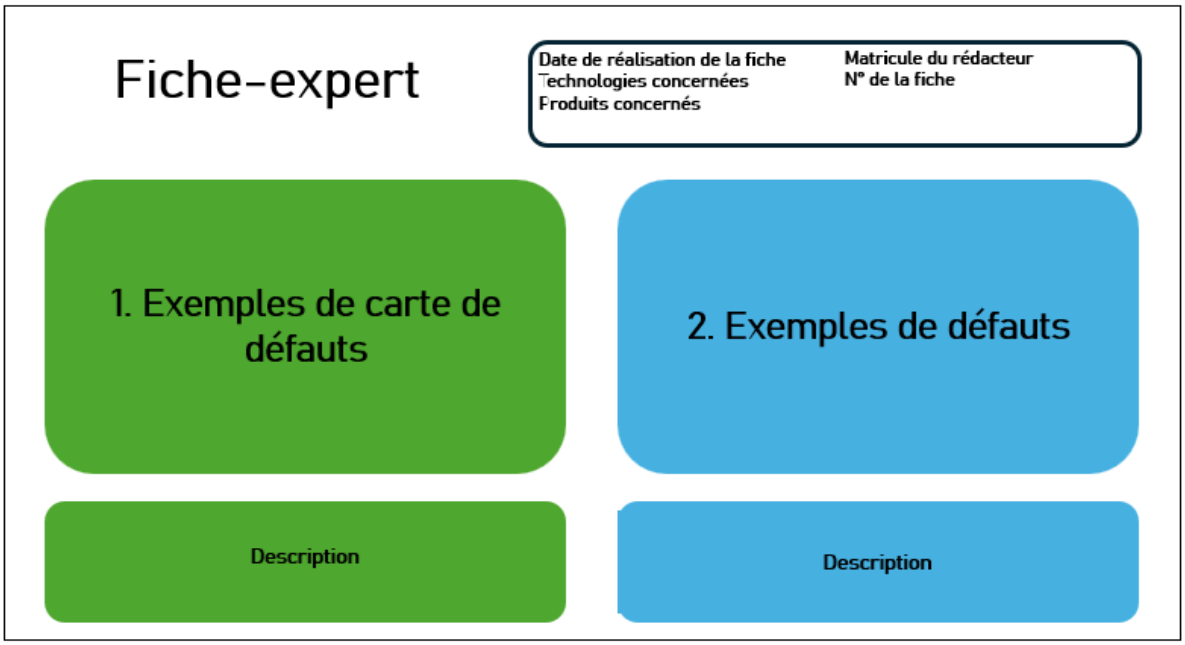


Figure 67 : Recto d'une fiche-expert (idéal-type).

Le verso des fiches-expert, quant à lui, indique la marche à suivre. Elle est explicitée dans l'encadré « Endiguement » : que doit-on faire du lot dans ce cas de figure ? comment l'alerte doit-elle être traitée, en pratique ? Le rédacteur de la fiche va dans le détail de ce que le technicien doit faire, clic par clic. Pour faciliter la compréhension et identifier les causes du problème qualité, des éléments explicatifs figurent dans la partie « Cause originelle ». Ils sont parfois accompagnés de schémas explicatifs qui montrent comment les plaques ont été endommagées. Dans d'autres cas, le propos est plus dense en termes techniques non explicités. Comme certaines fiches sont rédigées dans la foulée de la découverte de problèmes qualité nouveaux, elles ne formulent parfois que des hypothèses. Un pénultième encadré, « Impacts sur les lots » rend compte des conséquences de ces défauts en recensant les lots touchés et leurs pertes de rendement. Quand elle n'est pas laissée vide, la dernière partie de la fiche, « Documents associés », oriente enfin le lecteur vers des fichiers internes utiles.

Les techniciens se saisissent largement des fiches-expert pour s'aider dans leur analyse. « La fiche-expert nous dit quoi faire », explique Alfred en parcourant le dossier où elles sont contenues. Dans plusieurs cas, les fiches ne servent qu'à confirmer ce que les techniciens avaient déjà pressenti. Les documents permettent de faire le lien entre les observations empiriques des défauts qualité et leurs potentielles origines, lorsqu'elles ont été identifiées par l'équipe Suivi Temps Réel.

Utiles mais de qualité inégale, les fiches-expert présentent des degrés de pédagogie divers, ce que reconnaît Julia : « elles sont bien faites les fiches-expert pour la plupart, après pas toutes mais bon [les ingénieurs qui les rédigent] ont pas trop de temps. » Les techniciens qualité sont ainsi partiellement dépendants de ces fiches – et par extension des équipes des bureaux – pour bien comprendre et traiter les contrôles réalisés dans le service. Le répertoire des fiches-expert n'étant pas exhaustif, certaines

situations que peuvent rencontrer les techniciens n'y sont pas consignées. Dans ce cas, les techniciens expérimentés cherchent à répertorier des exemples proches pour établir la décision : « S'il n'y a pas de fiche-expert, je regarde si y'a pas des défauts similaires », indique Antoine. C'est alors par la mobilisation de la comparaison avec des situations connues et existantes que les techniciens tâchent de produire leur analyse.

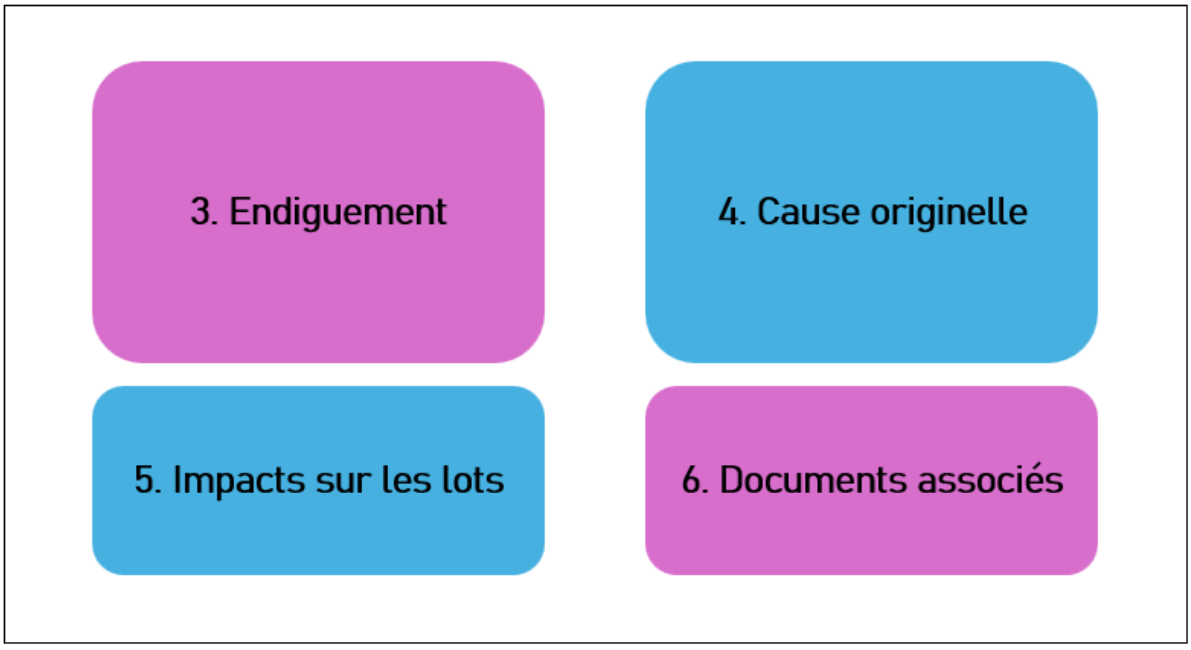


Figure 68 : Verso d'une fiche-expert (idéal-type).

Il existe une dimension injonctive dans ces fiches-expert supposées guider la marche à suivre pour les techniciens. Mais encore faut-il utiliser la bonne fiche ! Deux fiches-expert peuvent présenter des cartes de défauts (1) et des gros plans de défauts (2) proches, mais avec des procédures d'endiguement (3) totalement différentes.

Les conséquences d'un mauvais choix de fiche peuvent être graves pour le service Qualité. Quelques semaines avant notre visite, un contrôle qualité n'a pas été géré de façon opportune. Un nouvel arrivant a utilisé la mauvaise fiche-expert et l'erreur d'analyse n'a pas été repérée par les équipes des bureaux. Cela a conduit à arrêter une machine qui n'avait pas de problème alors qu'une autre (qui produisait les anomalies) continuait de fonctionner à plein régime. De nombreux lots défectueux ont ainsi été produits, avec des retards et des pertes financières conséquentes. En réponse à cette défaillance, l'équipe Suivi Temps Réel a ordonné de faire vérifier systématiquement l'ensemble des analyses qualité par les Tech. 4. Ces vérifications avaient été abandonnées à cause de la surcharge de travail courante, les Tech. 4 n'ayant plus le temps de faire des analyses ponctuellement et d'en vérifier d'autres pour soulager l'équipe des techniciens. Pour des activités déjà fortement rationalisées, l'augmentation de la demande en travail ne peut que dégrader la qualité du travail réalisé, si elle n'obtient pas de réponse en termes d'augmentation de la capacité à réaliser ce travail.

Encadrer et algorithmiser le travail : les procédures d'analyse

Les espaces de liberté laissés aux techniciens sont perçus comme des sources d'incertitude, d'erreurs, et deviennent des problématiques à part entière du point de vue de la direction du service Qualité. Pour y répondre, des procédures d'analyse ont été mises en place. Rédigées sur un PowerPoint et pilotées par l'équipe Suivi Temps Réel, les procédures d'analyse prolongent et généralisent la logique des fiches-expert. Elles se présentent sous la forme d'un logigramme qui détaille l'ensemble des étapes de l'analyse qualité. En principe, il serait possible de suivre pas à pas cette prescription du travail d'analyse pour produire des rapports d'analyse. Les procédures d'analyse viennent combler le déficit d'exhaustivité des fiches-expert en offrant la marche à suivre lorsqu'aucune fiche ne viendrait traiter un problème existant. Dans le même temps, elles peuvent introduire des incohérences : certaines fiches-expert renvoient aux procédures qui elles-mêmes renvoient aux fiches-expert premières.

Les procédures d'analyse font l'objet de nombreuses critiques de la part des techniciens qualité, notamment en ce qui concerne l'apprentissage des nouveaux arrivants. Pour Cécile, elles sont même des sources de dysfonctionnements. Elle estime que le tutorat et l'accompagnement sont de meilleures façons d'apprendre le métier, tandis que le service pousse vers la systématisation des procédures comme mode d'apprentissage. Antoine surenchérit : « [Les ingénieurs] ont fait une procédure pour simplifier les choses, et maintenant [les nouveaux Tech. 2] ils réfléchissent plus […]. Parfois t'as la procédure mais faut au moins se poser la question de s'il faut faire [telle action] ou pas. » Du point de vue des techniciens, les procédures d'analyse constituent un frein à l'apprentissage. S'il n'est pas clair qu'elles participent à déqualifier les travailleurs expérimentés, il semble qu'elles empêchent en tout cas la qualification des apprenants.

Pour les techniciens, les procédures constituent un cadre rigide qui cherche à transformer le travail d'analyse d'un travail de réflexion vers un travail d'exécution. L'activité d'analyse se voit réduite à une séquence d'actions mécaniques qui peuvent être simplement exécutées. Paradoxalement peut-être, les procédures se trouvent être aussi un point d'appui qui peuvent aider à guider l'action en cas de doute. Le problème tel qu'il est perçu par les techniciens ne réside pas nécessairement dans l'existence de ces procédures. C'est plutôt l'attente par les ingénieurs d'un usage systématique de ces procédures par les techniciens que ces derniers contestent. Au sein de ces procédures, en effet, la compréhension physique des phénomènes se trouve être une compétence ignorée. Elle garantit pourtant, selon les techniciens, la validité des analyses en fournissant un cadre de réflexion plus souple.

Ces formes de déconsidération et de déclassement du travail sont typiques de l'histoire de la mécanisation et de l'automatisation du travail (Schaffer 1994). Le travail est séquentialisé, algorithmisé, avant d'être automatisé. Ce processus suit une certaine logique : c'est précisément la segmentation en tâches distinctes d'un problème complexe, dans une tradition très cartésienne, qui permet de le résoudre (Descartes [1637] 2016), et, à plus forte raison, de le résoudre computationnellement. Le processus est aussi en cours dans le service Qualité, où un alternant a été recruté dans l'équipe IA dans le but d'initier un projet d'automatisation de la production des rapports d'analyse alors que, comme il me l'a confié lui-même, il n'a pas l'occasion d'en réalise. Un tel projet verra-t-il le jour ? Dur à dire, mais le travail d'analyse qualité apparaît difficile à décorréler d'un travail d'interprétation, encore inaccessible aux dispositifs d'IA. Les procédures d'analyse, qui éveillent la méfiance des techniciens, constituent finalement une étape

dans la réalisation de ce projet d'automatisation généralisée. A notre connaissance, il n'a pas été présenté aux équipes en salle blanche.

La mise en place de procédures comme résultat d'un cadrage situé du travail des techniciens

La volonté de rationalisation du travail d'analyse qualité dans une perspective de réduction des coûts est un facteur important dans la transformation de l'activité des techniciens, et des tentatives de fragmentation et d'automatisation de leur travail. Notre analyse ne peut pourtant pas se réduire à ce constat. Même si ces objectifs économiques peuvent structurer l'activité du service Qualité, ils n'apparaissent pas comme un motif explicite de ces transformations. Dans le service Qualité, l'argument souvent évoqué – publiquement – est celui du manque de fiabilité des techniciens.

Dans les précédents chapitres, nous avons cité à plusieurs reprises des propos d'enquêtés ingénieurs relativement critiques du travail des techniciens : « Quand tu vois que l'opérateur merde une fois sur trois tu te dis ça vaut le coup d'éviter la reclassification » (**III.**1.a) ; « Le ClassifiMotif, il est stable. Alors que l'opérateur, si c'est le matin, le midi, ou le soir, il va pas donner le même résultat à chaque fois. C'est cette stabilité qu'on recherche » (**II.**2.a). Après nos tentatives d'explicitation du travail des techniciens, et après avoir souligné leur professionnalisme et leur attachement aux analyses bien faites, de telles phrases peuvent étonner. Elles procèdent d'une essentialisation visiblement hyperbolique du travail réalisé en salle blanche. Pourquoi, depuis l'*open space*, le travail des techniciens est-il si mal considéré ?

Un élément de réponse est à aller chercher du côté de l'organisation du travail. Avant que nous ne visitions la salle blanche, Régis avait expliqué que les équipes de techniciens qualité étaient fréquemment renouvelées à cause d'un important *turnover*. Arrivé en salle, nous avons constaté que l'essentiel de l'équipe rencontrée était relativement expérimenté, et que la plupart de ses membres y travaillait depuis au moins trois ans. Où est alors le *turnover* ? Il serait plutôt à aller chercher du côté des équipes de nuit.

Nous ne pouvons ici que formuler une hypothèse puisque nous n'avons pas pu entrer en contact avec les équipes de nuit ni confirmer ce fait. Pour rappel, les salariés en équipes de nuit, en plus des contraintes liées à l'environnement de la salle blanche (bruit, équipements, aération), travaillent de 21h à 5h. Ce sont des horaires difficiles. Lorsqu'ils doivent participer à des formations, données le jour, ils doivent ainsi venir sur des horaires décalés par rapport à leur activité habituelle. Les salariés de nuit bénéficient d'une socialisation réduite puisqu'ils n'interagissent avec les équipes de jour que par mail interposé, en différé. L'ensemble de ces contraintes conduisent logiquement à des passages plus courts dans la salle blanche de l'atelier qualité. Pour réaliser un travail qui, nous l'avons vu, est largement dépendant d'un apprentissage collectif qui s'étend sur la durée, les départs réguliers des membres des équipes de nuit constitueraient une faiblesse du service Qualité. Ce travail de nuit est lui-même maintenu pour des raisons techniques (certaines étapes de fabrication doivent être réalisées dans des intervalles de temps déterminés) mais surtout économiques de continuité de la production. Que le *turnover* concerne les équipes de nuit ou non, il existe bien un important renouvellement des salariés qui amène au travail de nombreux salariés inexpérimentés.

En faisant référence aux travaux de N. Dodier (1995), P. Ughetto (2018a:55) explique que l'habileté technique est mise en scène au sein du collectif : « On n'effectue pas son travail dans l'anonymat et

l'indifférence, mais au contraire devant des *audiences* (les collègues, les chefs…) qui apprécient le degré d'aisance, de rapidité, d'habileté, d'assurance dont on a fait preuve. » L'énoncé se vérifie bien au sein même de l'équipe qualité. En dehors, en revanche, le travail est effectivement anonymisé. Signées par des matricules, les analyses sont sans visage. La répartition du travail sur des individus aux compétences hétérogènes est masquée du point de vue des ingénieurs, qui sont amenés à généraliser car ils n'ont pas la possibilité de distinguer. Ils ne perçoivent pas de différence entre techniciens expérimentés et techniciens novices, car ils ne les connaissent pas, ne les côtoient pas et ne savent pas comment ils travaillent. Dans ce contexte, le rasoir d'Ockham semble frapper, et l'explication la plus simple est conservée : les techniciens produisent un travail médiocre. Dès lors, du point de vue du service Qualité, le déploiement de technologies vues comme performantes et objectives apparaît dans la juste lignée de l'amélioration continue de la qualité du travail.

Au sein de l'équipe IA, qui voit s'établir ces procédures d'analyse sans participer formellement à leur rédaction, leur mise en place génère des débats. Pour Régis, manager de l'équipe IA qui a souvent insisté sur le manque de fiabilité du travail des techniciens, la procéduralisation du travail relève d'un impératif organisationnel : « On se bat pour que tout le monde respecte les procédures […] Si tu te fies à ton habitude t'es plus dans une démarche scientifique[346]. » Le verbatim est ici particulièrement intéressant au sens où il vient questionner la scientificité dans la pratique d'analyse. La rigueur scientifique, perdue dans l'habitude, serait retrouvée par le suivi d'une méthode stricte (les procédures). De ce point de vue, la procéduralisation du travail serait un moyen d'élever intellectuellement la pratique en la rattachant à des méthodes éprouvées. Les ingénieurs peuvent se montrer plus dubitatifs, en estimant à l'instar de Jérôme qu'il faudrait « trouver le bon curseur ».

On voit ainsi comment la méconnaissance du travail amène à défaire le collectif et à dissoudre l'apprentissage du travail dans une algorithmisation rigide des tâches. Parmi les motivations de l'automatisation du travail d'analyse figurent la volonté d'une réduction des erreurs, largement imputées aux techniciens. On voit pourtant que ce sont les conditions organisationnelles dans lesquelles s'inscrit leur travail qui conduisent à un apprentissage plus rigide, de moins bonne qualité. Le processus de déqualification dans sa dimension sociale (au sens d'une déconsidération progressive du travail effectué) conduit ainsi à une déqualification sur le plan technique.

[346] Propos recueillis lors de la restitution de l'étude aux enquêtés en février 2024.

Conclusion (IV.1)

Le constat dressé dans cette section rejoint largement celui de M. Benedetto-Mayer et A. Boboc (2021:116), « La “digitalisation” ne met pas fin aux tendances à la procéduralisation ou à la gestionnarisation déjà pointées, malgré la mise en place de technologies et d’organisations souples. » Au contraire, en réalité, dans le domaine industriel, la numérisation des activités contribue pleinement à la segmentation des tâches, et l’IA n’est qu’un nouveau jalon de ce processus.

Par ailleurs, comme le notent ces autrices, le débat s’est centré autour de la polarisation du travail entre travailleurs qualifiés, qui bénéficient des technologies et s’y adaptent, et travailleurs moins qualifiés, qui doivent se conformer à des rôles d’exécutants. Ce qu’on constate pourtant, c’est que le rôle d’exécutant est lui-même construit socialement et organisationnellement. Il est une conséquence de l’organisation du travail plutôt qu’un phénomène inné. Pour des tâches d’une grande complexité, comme celle de l’analyse qualité, les techniciens voient leur autonomie être contrainte par la rationalisation du travail et les choix organisationnels qui visent à l’optimiser. C’est l’organisation du travail qui déqualifie en créant des « configurations aliénantes » (Borel et al. 2024a). En dépit de ces processus imposés par la hiérarchie, les techniciens parviennent à conserver certaines marges de manœuvre. Elles restent maigres au regard des contraintes qui pèsent sur eux, mais leur permettent de s’individualiser vis-à-vis d’un travail de plus en plus procéduralisé. La dimension collective du travail et de l’apprentissage continue ainsi à être entretenue par les techniciens.

N’oublions pas, en outre, que les ingénieurs du service Qualité sont eux-mêmes aux prises avec ces dispositifs, au cours de leur conception puis dans leur suivi. La question de la déqualification surgit aussi dans le champ de l’ingénierie (Petit 2016) (cité par (Benedetto-Meyer et Boboc 2021)). La réalisation des tâches d’annotation et de nettoyage de bases de données, reléguées aux bureaux, en est une illustration sensible (**III.**2, **III.**3). Paradoxalement peut-être, le déplacement de tâches, on l’a vu, peut se caractériser par l’attribution de tâches fastidieuses vers les travailleurs perçus comme plus qualifiés. Il ne s’agit pas d’opposer deux groupes hétérogènes, mais de voir comment les contraintes économiques qui pèsent sur SemiCorp et sur le service Qualité sont acceptées par la direction. Conjuguée à une vision positive de l’automatisation, l’acceptation de ces contraintes contribue, *in fine*, au délitement général de l’expérience de travail.

2. Dynamiques de coopération entre la salle blanche et les bureaux

Salle blanche d'un côté, bureaux de l'autre. Jusqu'ici, nous avons largement traité les groupes des bureaux et de la salle blanche comme des groupes hétérogènes et séparés. La raison est assez simple : ils le sont, sur de nombreux plans, ce sur quoi nous aurons l'occasion de revenir (**IV.**2.b). Une question subsiste cependant : dans quelle mesure, et selon quelles modalités ces groupes sont-ils associés dans les processus de changement technologique au sein de SemiCorp ? Quelle part coopérative subsiste dans le travail et dans le déploiement de technologies malgré leur rationalisation ?

Depuis les années 2000, la promotion d'une coopération plus horizontale dans des structures fortement hiérarchisées est un lieu commun du discours managérial en entreprise (Ughetto 2018b:65). Les salariés sont encouragés à sortir de leur zone d'expertise pour échanger avec leurs collègues et leurs clients pour œuvrer travailler sur des situations complexes, forts d'une meilleure connaissance des possibilités et des contraintes de chacun. La coopération se traduit par la mise en place de dispositifs tournés vers l'extérieur (« l'innovation ouverte ») ou vers l'intérieur de l'entreprise (outils collaboratifs, réseaux sociaux internes) (Ughetto 2018b).

Ces initiatives ne sont pas toujours couronnées de succès. En cause, suggère C. Dejours (2021), l'inaptitude des organisations à distinguer « coordination » et « coopération ». Ces deux modalités organisationnelles développent un rapport différent à la relation sociale, absente chez la première et renforcée chez la seconde. La coopération viserait justement à s'inscrire dans les interstices de l'organisation formelle du travail, dans lesquels s'infiltreraient les salariés aux prises avec le travail réel et ses contraintes. Dans les cas que nous avons cités en introduction de ce chapitre, les modalités de coopération sont presque systématiquement ignorées par l'organisation du travail. Les préparateurs de commande sont gênés par leur casque qui, vissé sur les oreilles, complique les interactions et l'apport d'aide entre collègues (Gaborieau 2012), les capteurs ne rendent compte que partiellement des situations de terrain (Jonsson et al. 2018), les opérateurs tentent de remédier à la complexité de la prise de décision par un soutien fort du collectif (Blanc-Brude et Defélix 2023).

Dans ce contexte, des initiatives de coopération à l'échelle d'une organisation, et à plus forte raison lorsque celle-ci est fortement hiérarchisée et encadrée, peuvent-elles dès lors être décrétées ? Il faudrait pour cela laisser des espaces de liberté dans l'aménagement du temps de travail. Au sein du monde industriel, lorsque l'organisation est hiérarchisée verticalement, cette marge de manœuvre semble se restreindre d'autant plus que l'on descend dans l'organigramme.

Nous tâcherons dans cette section d'examiner les relations entre équipes du service Qualité en analysant les modalités de coopération et de non-coopération dans le travail (2.a). Dans un second temps, nous identifierons les freins à la coopération au travers de l'examen d'un triple cloisonnement spatial, socio-économique et organisationnel (2.b).

2.a. Coopérer dans la salle et avec l'extérieur : un travail d'empathie

Des formes de coopération et de non-coopération s'observent entre la salle blanche et les bureaux. Elles mobilisent des rapports à l'altérité particuliers qui témoignent de l'inscription de soi dans une organisation collective et plurielle. La dimension collective du travail d'enquête qualité, que nous avons jusqu'ici soulignée par petites touches, est cruciale au bon fonctionnement du service Qualité. Comme l'a montré G. Rot (2002), la fluidité technique ne peut suffire à assurer la fluidité des flux de production : la dimension sociale de l'action collective est également à prendre en compte. C'est pourquoi, malgré la centralisation de la gestion des flux de production, de nombreuses décisions s'inscrivent dans des échanges collectifs informelles qui visent à opérer un « travail de compensation » (Rot 2002).

Se mettre à la place d'autrui, une modalité du travail collectif dans la salle blanche

Dans différentes situations, les salariés sont amenés à se mettre à la place d'autrui de sorte à améliorer la fluidité de la production, de leur propre initiative et de façon informelle. Nous n'entendons pas par là qu'ils prennent physiquement la place de quelqu'un d'autre : il faut plutôt comprendre que les salariés s'imaginent les réflexions ou émotions que pourraient adopter leurs collègues collègue. Nous suggérons que cette coopération prend la forme de ce que l'on pourrait appeler un « travail d'empathie ». Cette notion désigne la mise en place par les travailleurs de stratégies de minimisation des contraintes de travail d'autrui en conséquence de la perception des contraintes organisationnelles pesant sur les salariés, et des effets émotionnels qu'ils peuvent susciter. Ce travail d'empathie diffère de celui qui est mobilisé dans l'accompagnement des familles de défunts (voir par exemple (Bernard 2008)), au sens où il ne s'exprime pas nécessairement dans une relation directe avec autrui, sous la forme d'une émotion. Il émerge plutôt comme une forme d'action et de solidarité collective dans le travail, et peut ainsi intervenir dans une activité de travail réalisée en solitaire. D'autres propositions ont aussi émergé pour offrir une lecture en terme « d'empathie organisationnelle » (Bernaud, Desrumaux, et Guédon 2021), qui ne soit plus seulement la somme des conscientisations individuelles des contraintes pesant sur autrui. L'empathie deviendrait un véritable élément de la culture du collectif, qu'il soit institué ou plus émergent. Dans ce cadre, le travail d'empathie apparaît comme la conséquence d'une solidarité collective, et prend concrètement la forme de pratiques de coopération.

Comment s'illustre ce travail d'empathie en pratique ? Il s'agit notamment pour les salariés d'anticiper la gêne que pourraient susciter leurs actions sur leurs collègues, en général parce qu'ils l'ont vécu au préalable. Lors d'une analyse qualité, Antoine souhaite par exemple réquisitionner une machine en local pour des examens approfondis. Cette action pourrait retarder d'autres lots qui passeraient normalement sur cette machine *via* la procédure standard de contrôle. Antoine prévient alors le ligneur, chargé de gérer l'attribution des lots aux machines de contrôle, avec qui il échange sur la situation actuelle, de sorte à négocier la réquisition de la machine. Antoine aurait pu s'y installer sans rien dire ; ce qu'il y a gagné ici, c'est l'assurance conjointe du bon fonctionnement de l'atelier et de la non-perturbation du travail de son collègue. Le maintien de bonnes relations de travail passe par une attention approfondie aux contraintes organisationnelles qui pèsent sur le collectif (ici liées à la disponibilité des machines).

La reprise des analyses qualité est justement une autre occasion pour les salariés d'interpréter les inscriptions rédigées par leurs collègues. Plutôt qu'une « prise de relai » spontanée dans le cours du

travail (Bidet 2017:33-34) – ce qui peut aussi arriver –, la reprise d'analyse est différée dans le temps, plusieurs jours ou semaines après l'analyse initiale. Les situations se présentent classiquement de la façon suivante : lorsqu'une analyse demande un examen complémentaire, ou qu'un lot relâché dans le circuit de fabrication revient dans le service Qualité, les techniciens ne partent pas d'une table rase. Ils reprennent les analyses antérieures réalisées par leurs collègues, auxquelles ils tâchent de donner du sens. Alors qu'elle se penche sur l'un de ces cas de figure, Julia relit à voix haute le rapport laissé par un autre technicien : « Alors ça c'est un cercle… Alors qu'est-ce qu'il a fait ? » Julia marmonne sa lecture en la ponctuant de « D'accord », pour bien marquer auprès de moi sa compréhension de ce qu'a voulu exprimer son collègue. Se mettre à la place d'autrui ici, n'est plus tant une marque d'empathie qu'un effort d'adaptation et de réappropriation du travail réalisé par d'autres, qui amène inévitable à contrôler ce travail. Les techniciens tâchent de s'inscrire dans une forme de continuité par rapport au travail réalisé par leurs collègues. Reprendre une analyse demande d'avoir bien compris ce qui a été fait, et d'ajouter des informations cohérentes plutôt que de fabriquer une nouvelle analyse parallèle. L'analyse est, en ce sens, enrichie des points de vue divers qui s'y sont penchés.

Cet effort est parfois ressenti de façon négative par les techniciens. Stéphane déplore qu'il ne puisse réaliser le suivi de ses propres analyses, parce qu'il n'est pas possible d'identifier simplement un lot qui a déjà été traité par soi-même, et parce que ce lot peut arriver dans l'atelier qualité à un moment où il n'y travaille pas. En pratique, Stéphane doit compléter les analyses des autres alors qu'il estime plus simple de suivre celles qu'il a lui-même initiées : « Un truc de fou c'est le temps qu'on perd. Les logiciels, et comprendre ce qu'ont fait les autres […] au bout d'un moment c'est chiant. » Au fond, la répartition du travail est telle que les techniciens sont considérés comme étant largement interchangeables, capables de reprendre n'importe quelle analyse comme s'ils en étaient à l'origine. Cette répartition agnostique du travail aboutit à imposer un contrôle des uns par les autres, que l'on retrouve dans les ateliers de production automobile sous l'impulsion conjointe d'exigences de traçabilité et de responsabilité (Rot 2000).

Dans l'effort à fournir pour s'adapter aux pratiques des autres surgit pourtant la preuve d'une diversité de pratiques et de façons de procéder. C'est là où le travail d'empathie ressurgit sous la forme d'une solidarité rédactionnelle. La connaissance des contraintes liées à la lecture d'un travail réalisé par les autres enjoint les techniciens à écrire le plus clairement possible. Face à la difficulté reconnue de *se mettre à la place de*, les techniciens tentent de rendre cet effort le plus maigre possible, en tâchant de contribuer à la qualité des analyses qu'ils produisent.

La gestion des erreurs des collègues entre tact et hiérarchie informelle

Parfois, les techniciens estiment que leurs collègues ont commis des erreurs. Ils se montrent d'autant plus diplomates lorsqu'il s'agit de technicien d'une autre équipe, qu'ils ne connaissent pas. Julia explique : « Tu vas pas dire à la personne "Tu fais de la merde", je t'apprends rien […] Entre équipes, c'est un peu sensible. On va te dire "Tu sais les équipes du week-end ils ont pas de support[347], ils sont tous seuls". » Le langage doit ainsi être adapté pour favoriser la bonne entente. Ici, la numérisation des modes de communication rend la discussion d'autant plus difficile que l'accès aux collègues est compliqué. Il

[347] Les « supports », c'est-à-dire les ingénieurs des bureaux, sont beaucoup moins nombreux le week-end et la nuit pour venir en aide à l'atelier qualité en cas de problème.

apparaît plus simple de faire preuve de tact et de pédagogie auprès de collègues qui sont bien connus et qui travaillent à quelques mètres. L'éloignement entre salariés est ainsi vecteur de potentielles concurrences, voire de tensions. Malgré tout, au sein même du groupe, des enjeux de hiérarchisation entre techniciens plus expérimentés et plus novices apparaissent aussi, notamment dans le discours de Stéphane : « Après t'es pas d'accord, mais est-ce que je dois aller à [l']encontre [d'un collègue] ? S'il a plus d'expérience, s'il est plus gradé que moi. C'est jamais simple je trouve. » Le recours à un champ lexical militaire (« gradé ») par Stéphane est assez révélateur des tensions hiérarchiques qui peuvent exister même au sein du groupe, d'apparence soudé, des techniciens.

Mettre (involontairement) des bâtons dans les roues : manuel de non-coopération

Les relations au sein du service Qualité prennent parfois le chemin de la non-coopération, voire de l'obstruction. Ce ne sont jamais des pratiques intentionnellement malignes, bien qu'elles puissent parfois être perçues avec agacement. Elles résultent précisément de l'absence de travail d'empathie, dont la possibilité est elle-même conditionnée à la connaissance des contraintes organisationnelles d'autrui. Nous détaillons ici des pratiques des ingénieurs déplorées par les techniciens, mais ne doutons pas que d'autres peuvent aller dans l'autre sens[348]. A plusieurs reprises, les ingénieurs de l'équipe IA ont par exemple déploré un manque de retour d'informations sur les dispositifs déployés en salle.

Cette non-coopération passe d'abord par le manque de clarté de certaines instructions. Dans des courriels, les ingénieurs des bureaux peuvent demander des prises d'image, de telle sorte à introduire un lien de subordination peu apprécié des techniciens. L'une de ces requêtes ennuie particulièrement Antoine, au poste de ligneur : « Alors là le message est pas bien clair […]. [Le mail] dit "Merci de faire la revue" mais on sait pas quel lot, quel équipement. Et puis "Merci de…" c'est bon, abrège. » Antoine conclut sa phrase avec un sourire mais il se montre agacé par le courriel, qu'il juge imprécis. La formule de politesse adressée par son collègue ne fait pas mouche et se trouve moquée par Antoine. Est-ce réellement la longueur du « merci de » qu'il souhaite abréger, ou plutôt le recours à un impératif déguisé à valeur d'ordre (Atifi, Gauducheau, et Maroccia 2017:178) ? Toujours est-il qu'un effort de clarification va devoir être entrepris par Antoine, augmentant ainsi sa charge de travail dans un contexte où il est déjà fortement sollicité.

La méconnaissance des pratiques de travail des techniciens par les ingénieurs entraîne des adaptations qui sont également à la charge des équipes en salle blanche. Des ingénieurs peuvent par exemple forcer des contrôles sur l'ensemble des vingt-cinq plaques d'un lot. L'atelier qualité ne réalise pourtant jamais autant de prises d'images sur un même lot, qu'il va plutôt échantillonner (deux plaques sur les vingt-cing, typiquement), faute de quoi les contrôles prendraient trop de temps. Ces règles sont essentiellement implicites, et restent peu connues d'une partie des salariés des bureaux, excepté ceux qui interagissent souvent avec la salle blanche. Lorsqu'elles sont repérées à temps, ces pratiques jugées mauvaises peuvent être résolues par le manager d'équipe en salle blanche, qui autorise les techniciens à rectifier la commande d'images.

[348] Nous n'avons pas suffisamment passé de temps avec l'équipe Suivi Temps Réel (deux heures en tout), qui gère l'essentiel du contenu en provenance des techniciens qualité, pour documenter de telles frustrations.

La non-coopération résulte essentiellement d'une représentation faussée du travail de la salle blanche, qui empêche dès lors de *se mettre à la place de*. Stéphane le déplore : « Ils gagneraient à comprendre nos problématiques et vice versa. » La numérisation et l'éloignement du travail ont contribué à favoriser ces dysfonctionnements.

Assister les collègues éloignés (1/2) : de la salle aux bureaux

Ces difficultés ne peuvent pas résumer la nature des échanges informationnels entre bureaux et salle blanche. Même si nous n'avons pas pu observer avec finesse les interactions entre l'équipe Suivi Temps Réel et la salle blanche, nous avons pu percevoir les fruits de cette étroite collaboration. Les réunions quotidiennes dans lesquelles sont présentées les problèmes de qualité repérées les jours précédents sont l'occasion de montrer comment le travail conjoint des différentes équipes permet de détecter et réparer les problèmes qualités. Ces réunions, qui visent à informer les salariés des bureaux des événements notables de la salle blanche (arrêt de machines, détection de problèmes de qualité importants), assurent la coordination de l'ensemble du service concernant les problèmes actuels, qu'ils soient urgents ou non.

Au-delà de ces temps formels, d'autres pratiques sont mises en place par les salariés, des bureaux comme de la salle blanche, pour faciliter le travail de collègues, même lorsque ceux-ci leur sont inconnus. Les témoignages des salariés montrent que ceux-ci apprécient fortement les efforts fournis par les collègues pour les aider, et aimeraient en bénéficier davantage.

Ce souci de bien faire apparaît dans la production des rapports des techniciens destinés aux collègues des bureaux. Dans la façon dont ils les structurent, comme dans la façon dont ils les illustrent avec des images qui doivent être les plus évocatrices possible, les techniciens visent l'intelligibilité et la clarté. Stéphane établit un plan détaillé de son analyse pour que son lecteur puisse suivre le fil de sa pensée. Julia, quant à elle, se montre compréhensive vis-à-vis des contraintes pesant sur les ingénieurs : « On remet tous les documents [aux collègues des bureaux] pour qu'ils aient pas à se casser la tête. […] Bah ouais ils ont tellement de travail. »

La recherche de la coopération pousse parfois les salariés à aller bien au-delà du travail prescrit. Un exemple l'illustre tout particulièrement. Claude, au moment où il est en charge du ClassifiMotif, reçoit un mail d'un technicien. Ce dernier lui indique qu'une plaque a été classée comme un motif particulier, auquel l'image ne ressemble pourtant pas du tout. Claude est surpris, car à ce stade de développement, le ClassifiMotif est en « mode *shadow* » et l'information n'est pas accessible facilement, ce qui signifie que le technicien a fait l'effort d'aller vérifier sur une interface difficile à consulter. Grâce à cette information, que Claude n'avait pas repérée, celui-ci a pu visualiser l'image en question, constater l'erreur, et repérer dans la base d'entraînement les exemples qui avaient pu induire le système en erreur. Claude a bénéficié de l'information trouvée par le technicien pour améliorer le ClassifiMotif. Alors qu'il me raconte cette anecdote, Claude estime qu'il s'agit d'un mode de travail idéal, dans lequel les retours de terrain du technicien contribuent à la performance technique du système. Il regrette que ces collaborations furtives ne soient pas plus fréquentes. Ici, c'est parce que le technicien a pris le temps d'aller approfondir son questionnement technique – en dehors de son cadre normal de travail – qu'un problème a pu être résolu.

Assister les collègues éloignés (2/2) : des bureaux à la salle

La dimension coopérative du travail n'est pas unilatérale. De la même façon, les ingénieurs dépassent parfois le cadre de leurs tâches prescrites pour venir en soutien des techniciens.

La coopération informelle est un vecteur d'apprentissage parallèle aux mécanismes que nous avons déjà soulignés (**IV.**1.c). Dans certaines situations, les ingénieurs peuvent faire preuve de pédagogie et prendre du temps pour expliquer aux techniciens pourquoi l'une de leurs analyses est erronée. Stéphane se rappelle d'un cas qui l'a particulièrement marqué. Les défauts qu'il avait visualisés paraissaient être des artéfacts issus de la capture d'images, alors qu'il y avait bien des particules sur la plaque : « J'avais classé [tous les défauts] en non-visible[349] mais [ma collègue] a renvoyé [pour refaire l'analyse], je comprenais pas le problème alors elle m'a expliqué. » L'analyse qualité a ici bénéficié d'une coopération simultanée de l'atelier qualité et de la salle blanche, chose rare étant donné le caractère normalement séquentiel de la chaîne d'analyse qualité. Ce temps pris par Stéphane et sa collègue ingénieure a permis de clarifier le problème mais aussi de contribuer à la formation de Stéphane.

Dans d'autres cas, la coopération peut aussi passer par la reconnaissance du travail réalisé. Stéphane nous montre un courriel dans lequel l'un des ingénieurs le félicite pour son identification d'un problème qualité particulièrement ardu. Dans ce mail, l'ingénieur écrit également son étonnement face aux anomalies qui « surchargent pour rien » l'atelier qualité, et plus particulièrement les techniciens. Là encore, cette réalisation a demandé à l'ingénieur de s'extraire du flux continu du service Qualité pour examiner des problèmes récurrents qui ne sont pas traités au quotidien. L'attention marque tout particulièrement Stéphane, qui y trouve l'occasion d'être valorisé dans son travail.

Ces marques de coopération montrent bien comment le travail d'empathie s'inscrit dans une solidarité collective générale qui allie salle blanche et bureaux. Le caractère épisodique de ces formes de collaboration doit cependant être souligné. La capacité à coopérer est dépendante des contraintes en termes de charge de travail, de délai. Salariés de la salle comme salariés des bureaux regrettent la rareté d'échanges qui sont pourtant fructueux sur le plan de l'apprentissage aussi bien que pour la performance économique de l'organisation.

[349] Autrement dit, Stéphane considérait qu'il n'y avait pas de défauts sur les images de revue qui lui étaient présentées.

2.b. Un triple cloisonnement contre la coopération dans le changement technologique

La coopération apparaît comme un moteur et un secours à l'organisation du travail. Elle permet de régler à la marge des problèmes locaux, et notamment en lien avec l'automatisation et la numérisation de l'espace de travail. En dépit de la forte prescription du travail, on constate ainsi la subsistance de pratiques informelles nombreuses. De là, une question reste cependant en suspens : pourquoi la coopération n'est-elle pas également mise en œuvre dans le travail de changement technologique qui a lieu dans l'organisation ?

L'argument qui va être développé est celui de l'existence d'un triple cloisonnement au sein du service Qualité, qui participe à configurer les relations de travail. Ce cloisonnement participe d'une obstruction aux possibilités de coopération dans les projets d'élaboration des systèmes d'IA, et plus généralement des innovations technologiques. Il met à distance les salariés en empêchant la constitution d'une connaissance du travail réalisé ailleurs qu'à son propre poste. L'usage du terme de cloisonnement est ici délibéré dans la métaphore maçonne d'une cloison qui s'érige, et qui pourrait s'abattre. Ces cloisonnements ne sont pas inéluctables et dérivent de plusieurs variables : spatiales, socio-économiques, et organisationnelles. Celles-ci contribuent à instaurer un « silence organisationnel » (Reverdy 2021) en dépit des velléités individuelles de coopération.

Pour illustrer cette idée, un parallèle mérite d'être dressé entre le cas investigué par la thèse et celui de S. Pachidi et ses collègues (2021), rapporté en introduction de ce chapitre. Nous évoquerons également les réunions trimestrielles qui réunissent personnels de la salle blanche et des bureaux. Alors qu'elles sont supposées décloisonner leurs interactions en situant l'ensemble du service au même endroit, nous verrons que ces réunions portent les stigmates de cette mise à distance et qu'elles faillissent à l'enrayer.

Cloisonnement spatial

La première dimension du cloisonnement est spatiale. Le sous-titre de l'ouvrage de S. Craipeau (2001), *Travailler ensemble séparément*, illustre parfaitement les modalités du travail dans l'industrie du semiconducteur. D'un côté la salle, de l'autre les bureaux. Pour passer de l'un à l'autre, il faut du temps – ne serait-ce que pour se changer –, mais aussi des autorisations, matérialisées par un badge qui ouvre, ou non, certaines portes. La matérialité complexe de la salle blanche et des processus de fabrication, ainsi que les enjeux de secret industriel qui les entourent, sont autant d'occasions d'éloigner les salariés de l'objet de leur travail (**II.**1.b). L'imperméabilité des espaces de travail divise les salariés en des groupes qui ne sont pas nécessairement homogènes mais qui, en tous cas, ne se rencontrent pas.

Sujet à une automatisation maximaliste, le travail de la salle blanche est d'abord déconsidéré parce qu'il n'est pas perçu ni connu par une partie de l'organisation. Il est probable qu'au travers de nos trois jours passés en salle blanche, nous ayons plus discuté avec les techniciens que la majorité des salariés des bureaux durant l'essentiel de leur carrière à SemiCorp. Dans le service Qualité, les nouvelles recrues passent en effet quelques heures en salle blanche auprès des techniciens au cours d'un parcours d'entrée qui vise à leur faire appréhender le fonctionnement de l'organisation du service. Hormis les

debriefs matinaux auxquels ils doivent parfois se joindre, peu d'autres opportunités d'échanges existent, qu'ils soient formels ou informels.

Pourtant, les réunions trimestrielles qui les rassemblent pourraient constituer l'opportunité d'une réflexivité autour des pratiques de travail. Elles sont l'occasion de briser momentanément le cloisonnement spatial en regroupant l'ensemble des équipes. Il est cependant marquant de constater comment, dans la façon dont s'assoient chacun des participants de ces réunions, il reste possible de tracer une ligne qui sépare presque exactement les places où s'installent les ingénieurs et celles où se placent les techniciens. Quand ils sont réunis, les groupes ne se mélangent pas, ne se parlent pas. Le cloisonnement spatial perdure lorsque tout est fait pour qu'il soit brisé. Le manque de coopération ne peut ainsi pas être seulement attribué à un éloignement géographique des sites de travail. Cela s'est vérifié de façon contrefactuelle. Nous avons suivi d'autres réunions (en visio-conférence, puis en présence) entre des ingénieurs du site investigué et ceux d'EuroSite. Lorsque les participants se réunissaient enfin après plusieurs mois à ne communiquer que par l'intermédiaire de leur ordinateur, les rencontres étaient bien plus chaleureuses, malgré la distance de leurs lieux de travail.

Le scénario a des similarités avec celui qui se déroule dans l'entreprise de télécommunications investiguée par l'équipe de S. Pachidi (2021). Les experts en mégadonnées, qui n'ont pas autorité sur le service de vente, ne travaillent pas dans le même département. Ils prennent d'eux-mêmes l'initiative du développement d'un système dédié à la vente, sans initialement en informer leurs collègues chargés de clientèle. L'organisation de réunions permet de provoquer cette rencontre, sans qu'elle ne soit fructueuse sur le plan des échanges de pratiques de travail. Elles justifient néanmoins la légitimité grandissante des experts en mégadonnées.

De ce point de vue, la distanciation spatiale entre les acteurs n'est donc pas tant un facteur direct d'exclusion des acteurs de processus d'innovation. Elle est plutôt un instrument de la méconnaissance du travail réalisé par les acteurs mis à distance, qui conduit à la formation de représentations faussées de la nature du travail et de son organisation.

Cloisonnement socio-économique

Un second facteur de cloisonnement dérive de l'hétérogénéité socio-économique générale entre les acteurs concernés par l'innovation industrielle. Les salariés de la salle blanche et ceux des bureaux ont des niveaux de qualification différents. De façon générale, ceux qui décident de l'automatisation, comme ceux qui la mettent en œuvre, apparaissent avoir fait plus d'études que ceux dont les tâches visent à être automatisées. Des différences socio-économiques conduisent à des différences de qualification qui elles-mêmes se traduisent par une différence de salaires[350]. Chez S. Pachidi et ses collègues (2021), de la

[350] Deux rapports de la Sous-direction des systèmes d'information et des études statistiques (SIES) du ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (2023a, 2023b) montrent une différence de salaires notable entre les salariés issus de DUT (médiane à 30 mois : 1730 euros) et ceux qui disposent d'un master (médiane à 30 mois : entre 2000 et 2200 euros). Ces chiffres servent seulement d'indicateurs et mériteraient d'être recontextualisés, ils permettent simplement de donner une vague idée des différences de salaires entre techniciens qualifiés et ingénieurs.

même façon, les experts en mégadonnées sont majoritairement diplômés au niveau master, tandis que les chargés de clientèle ont pour la plupart des formations de niveau baccalauréat.

Cette distinction est largement reconnue par les techniciens, à l'instar d'Antoine qui désigne les ingénieurs en reconnaissant « [qu']en bas ils ont fait des études. » Il fait quant à lui partie de ceux qui n'ont pas de formation initiale technique (contrairement à d'autres techniciens). En évoquant ce qu'elle appelle son « milieu de merde » comparé au « Graal » que représente à ses yeux SemiCorp (**IV**.1.a), Julia fait aussi montre des efforts qu'elle a dû fournir pour obtenir son emploi.

A nouveau, il existe une brèche dans ce cloisonnement : certains anciens techniciens travaillent désormais depuis les bureaux. Pour ce faire, Antoine rappelle qu'ils ont dû déployer des efforts supplémentaires : « Ceux qui sont sortis d'ici ils ont fait une VAE[351], ils ont bossé chez eux, ils avaient une bonne expertise. » Lui-même s'est vu répondre qu'il ne disposait pas des diplômes suffisants pour progresser dans la hiérarchie (**IV**.1.a). Le niveau de formation constitue une barrière immatérielle entre la salle blanche et les bureaux.

Même lorsque les ingénieurs présentent le ClassifiMotif aux techniciens lors des réunions trimestrielles, les efforts de pédagogie semblent insuffisants aux yeux de ces derniers. Les exposés sont rapides, les documents projetés sont en anglais et regorgent d'un jargon technique spécifique – qui vient s'ajouter à celui de la micro-électronique. Un manque d'accoutumance à l'ensemble de ces termes vient rendre d'autant plus difficile la constitution d'un espace de dialogue collectif, avec des mots communs.

On constate de la même manière un cloisonnement entre les ingénieurs des bureaux et leur hiérarchie. Jérôme, le responsable du développement du ClassifiMotif, déplore que certains projets d'automatisation soient pensés sans les membres de l'équipe IA, avec des idées d'autres managers, qui leur sont alors imposées[352]. Les ingénieurs sont alors embarqués dans ces projets en cours de route sans pouvoir y apporter de modification substantielle de l'intérieur. D'une certaine manière, l'équipe IA subit elle aussi une dépossession d'un espace de négociation sur le changement technologique. Ce constat permet de montrer que malgré l'hégémonie des ingénieurs dans la conception des systèmes algorithmiques – nous avons en effet parlé de « monopolisation verticale » (**III.**2.a) – ceux-ci n'ont pas la maîtrise de l'ensemble de l'intégration de ces dispositifs dans l'organisation, partiellement pensée sans eux.

Cloisonnement organisationnel

Un troisième cloisonnement, sans doute le plus important, vient enrayer la coopération dans les processus de déploiement technologique : le cloisonnement organisationnel. Il désigne l'ensemble des mécanismes qui distinguent les salariés sur le plan de leur fonction dans l'organisation. Il y a d'un côté les exécutants de l'analyse qualité, et de l'autre les sachants de l'analyse qualité, « qui ont le dernier mot », ainsi que le précise un technicien.

La forte dimension hiérarchique du travail à SemiCorp est l'une de ces caractéristiques. Elle vient différencier et formaliser les rôles de chacun des salariés dans les processus de travail. La stratification

[351] VAE pour Validation des acquis de l'expérience, une procédure d'obtention de diplômes par le biais de la valorisation de l'expérience professionnelle.

[352] Propos recueillis lors d'une discussion informelle en février 2023.

de la prise de décisions ne peut pourtant pas expliquer à elle seule l'exclusion de certains salariés de ces projets de déploiement technologique. Des directives et des aménagements venus des managers de plus ou moins haut niveau pourraient encourager la participation de chacun aux évolutions (technologiques ou non) qui les concernent. La place laissée aux techniciens dans l'organisation relève d'une perception managériale de leur interchangeabilité, pourtant mise en défaut par l'observation du travail (**IV.**1).

Les positionnements respectifs des salariés dans la chaîne hiérarchique peuvent partiellement s'expliquer par la socialisation des ingénieurs au cours de leur formation scientifique, en classes préparatoires puis en grandes écoles. Dans la lignée du travail de P. Bourdieu et J.-C. Passeron ([1970] 2005) sur la reproduction sociale à et par l'école, A. Allouch (2017) se penche sur le système de notation et en particulier celui des concours – passage fréquent pour de futurs ingénieurs. « L'institution scolaire », écrit-elle (2017:52), « par ses verdicts autant que par les savoirs qu'elle transmet, régule le rapport de l'individu à lui-même et lui attribue (ou lui assigne) une position dans un ordre social hiérarchisé, dès son plus jeune âge. » Le passage en écoles préparatoires, quant à lui, contribue à l'assimilation d'un rapport au temps particulier (Darmon 2015). Il faut apprendre à travailler dans l'urgence, ce qui porte « à faire de l'usage ultrarationalisé du temps la pierre de touche de l'excellence et de la fierté professionnelle » (Darmon 2015:308). La relation au savoir est elle aussi double, entre apprentissage de l'autonomie intellectuelle et du respect de procédures dans la résolution des problèmes (Darmon 2015). M. Darmon conclut ainsi que « [la classe préparatoire] prépare les élèves tout à la fois à subir et sans doute aussi à exercer et à imposer les modes de gestion des populations et les pratiques du nouveau management ».

Ces descriptions ne suffisent pas à prévoir les comportements des ingénieurs une fois incorporés dans leur milieu professionnel. Dans de nombreux cas, on l'a vu, les ingénieurs peuvent eux-mêmes se montrer dubitatifs vis-à-vis de l'intérêt et de l'utilité des projets sur lesquels ils travaillent. A l'échelle organisationnelle du service Qualité cependant, certains des principes repérés par M. Darmon semblent trouver un écho, aussi bien dans la mise en valeur des projets d'automatisation que du désintérêt pour les savoirs pratiques des techniciens. L'introduction des technologies de l'*Industrie 4.0* sont l'occasion de valoriser le savoir scientifique, l'abstraction et la résolution de problèmes d'optimisation. La formation initiale des ingénieurs constitue en cela un terreau fertile pour le déploiement vertical et imposé de ces dispositifs.

Le partitionnement organisationnel des salariés reste relatif aux projets menés. Pour le dire autrement, selon l'activité considérée, la distinction entre « ceux qui décident » et « ceux qui font » peut être déplacée. Les ingénieurs sont eux-mêmes réduits à des exécutants pour ce qui concerne les projets de changement technologique, qu'ils ne sont pas en mesure de refuser, à moins de s'engager dans une contestation ou un rapport de force qui ne paraît pas à l'ordre du jour. Sur l'ensemble de notre enquête de terrain, si des plaintes ont pu être exprimées vis-à-vis des modalités de déploiement de l'IA, l'idée d'un débat ou d'une négociation n'a jamais été évoquée.

On l'a vu, de nombreuses brèches viennent dissoudre partiellement les cloisonnements qui peuvent exister entre les salariés. Des rencontres régulières sont organisées, des salariés valident leur ascension professionnelle en descendant de la salle blanche vers les bureaux. Il semble que ce ne soit pas suffisant pour abattre le cloisonnement organisationnel, qui continue de maintenir chacun des salariés au poste qui lui est réservé. Plutôt qu'à s'y additionner simplement, les deux cloisonnements précédents paraissent

en réalité accentuer le cloisonnement organisationnel. A. Rallet et A. Torre (2001) montrent ainsi que la proximité organisationnelle entre les groupes d'acteurs concernés – y compris au sein d'une même entreprise – est un facteur de plus grande importance que la proximité géographique pour la diffusion des technologies de l'information et de la communication. Dans les années 2000 déjà, pour ces auteurs, l'enjeu est de parvenir à communiquer des pratiques et des savoirs complexes, et en particulier les plus tacites d'entre eux. L'éloignement géographique, tout comme les différences socio-économiques, sont des facteurs de brouillage de cette communication, mais encore faut-il que des dispositifs soient mis en place pour la favoriser.

Le cloisonnement comme facteur du focus sur l'acceptabilité

Au travers de l'esquisse de ce cloisonnement, il est possible d'interpréter les conditions du déploiement des systèmes d'IA dans les organisations. Nous avons tout au long de notre développement évoqué les modalités stratégiques mises en place par l'équipe IA pour parvenir à l'adhésion des salariés, entre « acceptabilité » et « acceptation » (Bobillier-Chaumon et Dubois 2009), voir (Tableau 12).

Stratégie mise en place	**Orientation de la stratégie…**		**Sous-section où l'argument est développé**
	vers les techniciens	*vers les ingénieurs*	
Mobilisation des promesses de l'IA	Acceptabilité	/[353]	(**II.**2.b)
Constitution d'alliances au sein du service	Acceptabilité	Acceptation	(**III.**3.b)
Fiabilisation de la correction du dispositif	Acceptabilité	/[354]	(**III.**4.a)

Tableau 12 : Stratégies mises en place par le service Qualité pour favoriser l'adhésion du ClassifiMotif.

Nous suggérons que le triple cloisonnement existant entre la salle blanche et les bureaux du service Qualité est l'un des facteurs majeurs de l'orientation de la stratégie d'adhésion de l'équipe IA vers une stratégie d'acceptabilité des techniciens, voir (Figure 69). L'équipe IA s'adonne à des anticipations *a priori* de facteurs d'acceptabilité en ne prenant que faiblement en compte les effets du déploiement du système sur les pratiques actuelles de la salle blanche. L'idée même d'engager une discussion avec les futurs utilisateurs apparaît de l'ordre de l'inconcevable. Je garde un souvenir tenace d'un coup de téléphone passé à Jérôme, alors en télétravail, en janvier 2023. La discussion portait alors sur le motif « spirale » dont la définition était difficile à établir, notamment car une crainte subsistait sur sa compréhension par les techniciens (**III.**3.b). J'avais alors à tout hasard, demandé s'il était envisageable d'en discuter avec eux directement, l'espace de quelques instants. La question avait alors généré un silence épais chez mon interlocuteur. A tel point qu'après quelques secondes, un peu gêné, j'avais suggéré une porte de sortie :

[353] Nous n'avons pas suffisamment collecté de contenu empirique sur cette dimension de la stratégie d'adhésion pour prononcer un résultat.
[354] *Idem*.

« C'est peut-être pas dans vos pratiques… », ce à quoi Jérôme avait acquiescé dans un souffle sans élaborer.

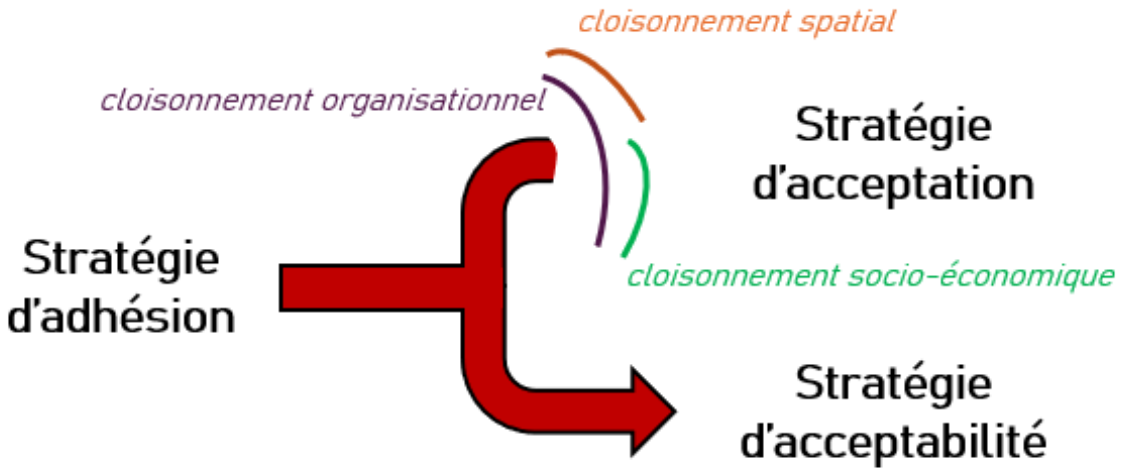


Figure 69 : La stratégie d'adhésion des salariés menée par le management peut se traduire aussi bien selon une stratégie d'acceptation qu'une stratégie d'acceptabilité. Nous suggérons que les cloisonnements existants entre concepteurs et utilisateurs sont à l'origine d'une orientation préférentielle vers la seconde.

Conclusion (IV.2)

Dans les organisations, explique le philosophe R. Sennett (2013:19), il existe une incohérence entre une coopération souhaitée *a priori*, mais pas appliquée en pratique : « En principe, chaque organisation moderne est favorable à la coopération ; en pratique, la structure des organisations modernes l'entrave : il est pris acte de ce fait dans les discussions managériales sur "l'effet silo", l'isolement des individus et des départements en différentes unités, des gens et des groupes qui partagent peu et qui thésaurisent des informations précieuses pour d'autres. Les changements touchant le temps que les gens passent à travailler ensemble accentuent cet isolement. »

Nous avons proposé dans cette section d'illustrer sa pensée sur le plan organisationnel. Dans le travail quotidien, la coopération entre les salariés est effective, permanente et se met systématiquement au service de l'organisation et de ses objectifs de productivité. Les salariés sortent du cadre prescrit du travail, encadré par des systèmes sociotechniques porteurs de contraintes, pour favoriser la fluidité du travail. Même si leur travail est évalué de façon individuelle, ils se donnent des coups de main, réfléchissent et se remémorent ensemble. Comme le travail d'analyse qualité s'étend sur le temps long et que les plaques sont amenées à venir et revenir au sein du service, les techniciens sont mécaniquement amenés à prendre en main le travail effectué par les collègues. Obligés de se mettre à la place des autres, ils s'engagent dans un travail d'empathie qui vise à faciliter la compréhension du travail des collègues, et à faciliter la transmission de leur propre travail. Il n'empêche, dans certains cas, des frictions peuvent apparaître lorsqu'ils considèrent que ce travail d'empathie n'a pas été correctement réalisé. Lorsque ces pratiques de non-coopération surgissent, c'est avant tout parce que des contraintes organisationnelles ne permettent pas de les surmonter, ou parce que les représentations du travail d'autrui sont faussées. La coopération est recherchée, et son manque est déploré.

Pourtant, dans la mise en place de projets de déploiement technologique comme celui du ClassifiMotif, la coopération est quasiment réduite à néant. Elle n'est plus recherchée par les concepteurs du dispositif, qui n'en voient pas l'intérêt. Ce constat corrobore l'analyse d'A. Henriksen et L. Blond (2023), dont nous nous sommes déjà fait l'écho dans le chapitre précédent : le système d'IA est à destination de la gestion du service avant d'être à celle de ses utilisateurs quotidiens. Dès lors, toutes les promesses concernant l'amélioration du travail (**I.**2.c) ne peuvent que s'exaucer de façon marginale. Elles ne sont aucunement l'objectif central poursuivi par les managers de haut niveau.

On voit ici le lien entre la « reconfiguration » de l'organisation de P. Leonardi et S. Barley (2010) et l'appréciation des pratiques de conception des dispositifs. Le cloisonnement entre la salle blanche et les bureaux est à l'origine d'un cloisonnement épistémique dans la conception des dispositifs, qui vient à créer de nouveaux savoirs plutôt qu'à s'inspirer des existants (**III.**3). Dans le travail des utilisateurs, cette transformation conduit à des adaptations ou à des décalages qui pourraient agrandir plus encore le fossé entre le travail tel qu'il est effectué en pratique, et tel qu'il est pensé depuis les bureaux des managers. De ce point de vue, l'IA ne constitue qu'un jalon parmi d'autres d'un parcours de transformation numérique du travail, qui repose finalement sur des logiques économiques et organisationnelles déjà anciennes.

Conclusion

Nous arrivons au terme de ce manuscrit. En guise de conclusion, nous proposons de revenir brièvement sur une synthèse des contributions principales de cette thèse, avant d'aborder deux angles limites qui mériteraient (ou auraient mérité) un défrichage plus approfondi. Nous en profiterons pour tracer, dans la foulée des pistes de recherches qui nous paraissent pertinentes. Pour finir, nous nous permettrons quelques réflexions plus normatives en faveur d'une réflexion éthique collective sur le déploiement des technologies.

1. Contributions principales

De la validité des promesses

La mise à l'agenda du déploiement de l'IA dans l'industrie s'inscrit assurément dans la poursuite d'objectifs économiques. Ces objectifs relient aussi bien les émetteurs de la promesse, qui y voient l'opportunité de bénéficier d'investissements conséquents, que les récepteurs, qui envisagent la possibilité de nouvelles sources de croissance. Et pourtant, les promesses d'efficacité, de productivité, mais aussi de réduction d'erreur sur la base d'un principe d'objectivité technique, ne se vérifient pas systématiquement. Tout l'agencement technique des dispositifs d'IA est imprégné de choix et pratiques profondément situées : production des données, construction de catégories, transmission d'informations, intégration du dispositif dans une organisation existante, évaluation du système. Ces processus sont longs, coûteux et exigeants, pour des résultats sur lesquels planent toujours une certaine incertitude. Il y a là un travail de longue haleine, collectif, au cœur du projet de rationalisation des activités de production. Le déploiement de l'IA, en ce sens, constitue un nouveau jalon d'un processus centenaire de recherche de productivité au travail.

La valeur prédictive de ces promesses est en vérité assez limitée, ce qui ne les empêche pas d'avoir une importance non négligeable dans les processus de diffusion de l'innovation. Les promesses sont d'abord des instruments discursifs pour susciter l'intérêt de technologies dont les modalités d'usage ne sont pas encore éprouvées. Alors qu'une étude récente montre un important taux d'échec des projets d'IA générative entrepris dans les organisations (Challapally et al. 2025), les fondations du château rhétorique des promesses semblent vaciller. Le problème, révèle l'étude, ne réside pas tant dans la technologie en elle-même, que dans les modalités d'intégration de ces technologies. Ce qui est en jeu, c'est la temporalité des promesses, qui ont pu exciter le sentiment d'une immédiateté de la récompense en termes de productivité. Pour ce qui concerne les systèmes d'IA que nous avons décrits, les expériences montrent qu'une telle instantanéité n'est tout simplement pas possible sur les plans organisationnel et technique. Cela ne signifie pas que des dispositifs d'IA ne peuvent pas apporter de gains substantiels, seulement que ce processus demande du temps, et des ressources.

Dans l'idée d'étendre la portée des analyses de l'économie des promesses, nous nous sommes outillés du concept de « propagation » (Boullier 2023) pour montrer que les promesses n'étaient pas seulement émises et reçues par les acteurs. Certes, les discours formulés à l'envi sur l'IA participent à cadrer les débats qui se tiennent ensuite dans les entreprises, mais ils ne les déterminent pas. Au sein des

organisations, à plus petite échelle, de nouveaux facteurs entrent ainsi en compte pour l'évaluation de la validité des promesses. Recevoir une promesse ne signifie pas nécessairement y adhérer. Paradoxalement, à Mecanex, nous avons ainsi observé des attitudes de défiance vis-à-vis des promesses de la part d'acteurs pourtant intéressés au déploiement de systèmes d'IA. Le caractère parfois irréaliste des discours grandiloquents y est considéré comme un obstacle pour bien mener ces projets. Lorsque ce n'est pas le cas, comme à SemiCorp, les promesses sont alors largement mobilisées pour appuyer les desseins du management.

Déployer par le haut

L'approche par l'énaction en sociologie des techniques suggère qu'il est difficile d'identifier *a priori* l'effet des technologies sur leur environnement organisationnel. Le résultat est connu au moins depuis les années 1980 : des technologies similaires, dans des environnements de travail en principe similaires, peuvent produire des effets opposés selon les modes d'organisation du travail (Barley 1986). C'est l'une des raisons pour lesquelles les discours sur l'IA ne peuvent pas être pris pour argent comptant et généralisés. Dès lors, il faut déporter son regard du dispositif technique en lui-même, pour questionner son introduction dans l'organisation, ses pratiques de conception, son déploiement.

Et que constate-t-on ? Des propositions émanent parfois des salariés eux-mêmes : le phénomène paraît d'ailleurs s'amplifier avec l'utilisation camouflée de l'IA générative (Ferguson 2025b). En dehors de ce cas de figure tout récemment mis en lumière par la littérature, nous avons pu observer à SemiCorp comment ce type d'initiative personnelle pouvait être rattrapée par le management. Lorsque les gains sont perçus par la direction, ce sont alors des logiques d'intégration descendantes qui se mettent en branle. Tout au long de ces processus, les salariés vus comme les moins qualifiés restent considérés par leur direction comme des réceptacles d'une innovation technologique inéluctable, à laquelle ils vont devoir se conformer. La mise en place de stratégies d'acceptabilité vise à les convaincre du bien-fondé de ces développements, de sorte qu'ils consentent à un changement technologique dont ils sont délibérément exclus. Ces stratégies visent aussi à protéger les équipes en charge de l'introduction des technologies, qui peuvent alors démontrer qu'elles ont fait ce qui est en leur pouvoir pour favoriser le bon déroulement des projets ; d'éventuels échecs, dès lors, ne sauraient leur être imputés.

Conception du système, conception du travail

Au cœur de la conception des dispositifs d'IA, les ingénieurs chargés de leur déploiement apparaissent tenir une posture ambiguë. D'un côté, ils dominent largement le travail épistémique qui sous-tend le système en opérant selon ce que nous avons appelé une monopolisation verticale du travail des bases de données. Nous espérons, en mettant en avant cette répartition particulière du travail, enrichir le champ des *ground truth studies* qui s'appuient encore rarement sur des cadres d'analyse organisationnels. Dans la configuration de la monopolisation verticale, les ingénieurs sont à la manœuvre pour diriger la catégorisation, l'annotation et le peuplement des données. Ils se lancent dans une reconstruction des savoirs qui fait fi des savoirs existants. Ces pratiques ne relèvent pas seulement d'une esthétique de la donnée ou d'une volonté d'optimisation technique. Comme nous l'avons montré, elles embarquent aussi avec elles une certaine vision de la distribution du travail. Le travail épistémique participe ainsi à prescrire la place donnée aux injonctions du système d'IA dans la prise de décision. Pourtant, d'un autre côté, le

travail des ingénieurs de l'équipe IA n'est pas spécialement valorisé. Il reste un labeur de fond, largement invisible, qui intègre de nombreuses tâches fastidieuses et ne se révèle pas particulièrement épanouissant. C'est à ce prix que subsiste l'autonomie laissée aux ingénieurs dans la conduite de leur travail conceptuel. Contrairement à une partie de leurs collègues hyperspécialisés, concentrés sur des problèmes de production spécifiques en continu et en temps réel, les ingénieurs de l'équipe IA ont l'opportunité de mener de bout en bout un projet dans lequel ils font *de tout*, entre travail de catégorisation, rencontre des responsables d'ateliers, et évaluation finale.

Au lieu d'être ponctuel dans le cadre d'un projet bien délimité temporellement, le recours à l'IA semble devoir prolonger dans le temps l'investissement de ses concepteurs, qui continuent à l'ajuster après déploiement. Le travail d'intégration de l'IA fait l'objet de ce que nous avons appelé une maintenance épistémique, au cours de laquelle les ingénieurs réalisent une mise à jour permanente des bases de données d'apprentissage. L'opération s'avère incontournable parce que des dysfonctionnements nouveaux apparaissent à mesure de l'introduction de nouvelles machines, de la production de nouveaux types de plaques. Maintenir le système d'IA, c'est alors assurer la capacité du modèle algorithmique à remplir les objectifs de performance.

L'automatisation peu automatique du travail de la salle blanche

La production des technologies du semiconducteur s'opère aujourd'hui dans un environnement très particulier, dense en dispositifs techniques. Une grande partie du travail de production dans l'industrie de la micro-électronique s'est déplacée vers la gestion de parc de machines. Le contrôle de leurs défaillances et dysfonctionnements concentre l'attention des salariés, et d'autant plus dans les services Qualité. L'automatisation tend à déplacer le travail autant qu'à s'y substituer. En l'occurrence, les techniciens ne gravent pas les plaques, mais ils s'assurent que les gravures sont bien réalisées. De la même façon, ils ne déplacent pas les chariots de plaques, mais doivent vérifier qu'elles sont acheminées au bon endroit. Ces tâches (plus ou moins) nouvelles demandent à déployer toute une « virtuosité » – pour reprendre le terme de N. Dodier (1995) – qui échappe en grande partie à la hiérarchie. Quoi de plus normal en réalité : les décideurs ne sont pas là pour la voir s'esquisser. La « dimension dramaturgique » (Dodier 1995) de la mise en scène de l'habileté se joue au sein des équipes, sans que ne soit dépassé ce cadre restreint et isolé (spatialement, socio-économiquement, organisationnellement).

Dans ce milieu particulier, la prescription du travail progresse inexorablement. Pour satisfaire les objectifs de qualité totale, le management joue sur l'ensemble des leviers qui lui paraissent pertinents, et renforce le contrôle du travail des techniciens à cette fin. Les salariés, pourtant employés pour corriger les dysfonctionnements des machines, sont paradoxalement considérés comme des sources d'erreur. En amalgamant l'ensemble des techniciens quelle que soit leur équipe, quelle que soit leur expérience, les managers commettent probablement une faute. Le cloisonnement entre salle et bureaux conduit à un décalage de représentation du travail et des travailleurs, laquelle se traduit par une homogénéisation des salariés. La situation qui nous a été exposée lors de l'une de nos visites en salle blanche a été suffisamment claire : le jour où le technicien débutant se trompe, c'est dorénavant l'ensemble des analyses des techniciens qui doivent subir un contrôle supplémentaire.

On l'a vu, ce n'est pas forcément l'IA qui est mobilisée pour structurer le travail : des procédures *à l'ancienne* participent à cadrer les activités dans le but de les standardiser et de réduire la marge de manœuvre des techniciens, et supposément, le nombre d'erreurs qu'ils réalisent. En creux, dans la procéduralisation du travail, on voit poindre les prémisses de l'algorithmisation de l'activité à laquelle les méthodes d'IA pourraient être mise à contribution dans le futur. Des tâches mieux découpées, mieux formalisées, sont plus faciles à automatiser.

Il serait pourtant malhabile de considérer ce processus à l'aune seulement d'une marche inéluctable de l'automatisation. Les techniciens entretiennent avec ferveur la dimension collective de leur travail, contredisent les résultats des systèmes d'IA, tiennent à l'accompagnement mentoré des nouveaux salariés. Ils se ménagent ainsi des espaces de liberté dans le travail, espaces étroits mais auxquels ils tiennent et qui, probablement, les font tenir. Si ces espaces sont si réduits, c'est peut-être aussi parce que les salariés du service Qualité, dans son ensemble, ne réalisent pas à quel point leur travail est essentiel à la bonne conduite de la production. Les technologies de l'*Industrie 4.0* sont décrites comme flexibles et réactives parce que leurs manquements en termes de flexibilité et de réactivité sont sans cesse corrigés par les salariés. Voilà pourquoi l'idée d'un individu « diminué par l'IA » – pour reprendre la thèse de M. Bertolucci (2023) – ne paraît pas tenir. La diminution n'est pas tant celle des capacités cognitives, que celle (éventuelle) des capacités d'action. La question mérite alors d'être déplacée vers les possibilités de négociation de ces capacités d'action. C'est de l'importance de cette réflexion dont nous discuterons après avoir présenté quelques réflexions qui n'ont pas été intégrées dans le périmètre de la thèse.

2. Limites de la thèse

L'analyse présentée dans cette thèse ne prétend pas être complète, elle présente des écueils relatifs notamment à deux angles morts que nous rapportons rapidement : les variables de genre et le rôle des managers.

Genre et micro-électronique

Parce qu'il a généralisé au masculin les salarié·es, travailleur·euses, ingénieur·es, technicien·nes, le récit brodé par la thèse a pu laisser penser que l'industrie de la micro-électronique était un univers essentiellement masculin. Cette impression mérite d'être nuancée, mais reste fondée. Une récente étude a montré en ce sens que seulement 20 à 25% des personnes employées dans le domaine étaient des femmes (Global Semiconductor Alliance et Accenture 2022). Dans plus de la moitié des entreprises sondées, moins de 5% des postes à responsabilité sont occupés par des femmes.

Une telle disparité donne le tournis. Elle est bien connue des sciences sociales qui ont montré que le secteur des technologies du numérique était un « bastion masculin » (Maruani et Nicole-Drancourt 1989) (citées par (Flécher 2024)), qui peinait encore à se féminiser. Pourtant, les industriels du semiconducteur cherchent à diversifier leurs recrutements. Des firmes peuvent en ce sens mener des politiques d'encouragement à la formation des femmes dans les filières scientifiques. Engagement

véritablement féministe ou communication bien rodée en forme de blanchiment rose (*pinkwashing*[355]) ? De nombreuses entreprises étasuniennes du numérique (IBM, Meta, Intel) ont récemment abandonné leurs politiques d'inclusion à la suite de l'élection du président Donald Trump (Murray et Bohannon 2025). L'un des moteurs de ces politiques en faveur de l'inclusion des femmes reste la recherche de main d'œuvre supplémentaire dans un secteur qui continue de croître à l'échelle mondiale (Menon 2023).

Qu'en est-il à SemiCorp ? Si la (petite) équipe IA est exclusivement constituée d'hommes, le service Qualité compte dans ses rangs de nombreuses femmes. Nous ne disposons pas d'un décompte précis mais avons noté une présence notable de femmes, aussi bien dans les bureaux que dans la salle blanche où nous avons suivi une équipe quasiment paritaire. Si des femmes – à l'instar de Delphine – occupent également des postes de managers de proximité, une large majorité des postes plus haut placés sont cependant affectés à des hommes. Au sein du service Qualité, je n'ai pas mis en place de méthode précise pour m'intéresser à ces problématiques. Socialisé en tant qu'homme, il est tout à fait possible que je n'aie pas été sensible à des comportements ou propos qui auraient fait *tilt* chez d'autres personnes.

En revanche, lors d'un autre événement ne concernant ni le service Qualité de SemiCorp, ni Mecanex, mais réunissant de nombreux ingénieurs, chercheurs et cadres de la micro-électronique, j'ai été témoin d'une *blague* indubitablement sexiste, prononcée à haute voix. Elle a été accueillie par des rires, sans protestation visible. De nombreux facteurs peuvent expliquer un tel manque de réactions sur le coup, et même par la suite. Cette anecdote témoigne malgré tout de la subsistance de situations de discriminations sexistes dans les organisations, et en particulier dans le secteur des nouvelles technologies. Si, au cours de notre enquête, nous n'avons pas réellement pris attention aux variables de genre, elles ont ainsi pu parfois s'imposer à nous.

Il serait pertinent d'investiguer, sur le plan organisationnel, la façon dont ces mécanismes de discrimination peuvent influencer la conception et le déploiement des nouvelles technologies. Qui a son mot à dire ? comment l'identité de genre mais aussi le statut au sein de l'entreprise, l'âge, l'expérience professionnelle, la classe sociale peuvent-elles conduire à orienter le cours des projets d'automatisation ? et avec quelles conséquences organisationnelles concrètes ? Ce sont des pistes de questionnement qui pourraient être intéressantes à suivre dans le cas du déploiement de l'IA et des technologies numériques en général.

Le rôle des cadres dirigeants dans la propagation des promesses

Majoritairement cantonnée à l'équipe IA, notre enquête ethnographique à SemiCorp a peiné à s'extirper d'un contexte très localisé et situé. Ce que nous avons gagné en finesse de description, nous l'avons peut-être perdu en portée généralisatrice et contextuelle. En particulier, nous avons eu des difficultés accéder à des managers de haut niveau et aux cadres dirigeants de SemiCorp. Nous avons expliqué que cette contrainte était liée à une volonté d'assurer l'intégrité du terrain dans un contexte où ses fondations restaient fragiles. Ce faisant, nous avons réduit notre appréciation des velléités d'automatisation à ce que

[355] Inventée par l'association étasunienne Breast Cancer Action qui lutte pour soutenir les femmes atteintes du cancer du sein, l'expression *pinkwashing* (sur le modèle du *greenwashing*) dénonce la pratique qui consiste pour une organisation à présenter une image engagée en faveur des femmes et des personnes LGBTQIA+ à des fins mercatiques plutôt que pour véritablement soutenir les personnes concernées.

ces managers pouvaient exprimer en réunions – les seuls moments où nous avons vraiment pu collecter leur positionnement. Lors de ces réunions, les managers de haut niveau portaient hauts les objectifs qu'ils cherchaient à faire adopter par leurs subordonnés. Cette forme d'expression semi-publique pourrait cependant différer de leurs propres représentations personnelles. Malheureusement, certaines portes nous sont restées closes en dépit de notre présence régulière sur le terrain. Nous n'avons ainsi pas pu assister aux entrevues entre la direction du service Qualité et le management de l'équipe IA afin de comprendre comment les objectifs du déploiement de l'IA étaient imposés et / ou négociés avec les managers de proximité. Ces données nous auraient notamment permis d'évaluer avec plus de précision la diffusion des promesses et leur potentielle réinterprétation d'un échelon à l'autre. Elles auraient aussi pu mettre en évidence d'éventuelles modalités de négociation du déploiement de l'IA, non plus à l'échelle des salariés faisant face aux dispositifs, mais plutôt à celle des décideurs locaux.

Une situation en particulier n'a pas été élucidée. Nous avons collecté des témoignages de pression ressentie par des membres de l'équipe IA, et avons constaté la volonté d'un déploiement rapide du ClassifiMotif par la direction du service Qualité. Pourtant, celle-ci semble avoir accepté l'accumulation des retards (plus de six mois). Nous n'avons malheureusement pas pu rendre compte de ce processus dynamique de négociation, qui montre que le management est capable de retarder le déploiement des projets mais que, malgré ces concessions, leurs responsables restent sujets à des situations de stress.

Nous n'avons pas non plus pu estimer la manière dont ces perceptions managériales étaient forgées ni à quel degré. Convictions profondes ? ou de façade pour remplir des objectifs fixés par leur propre hiérarchie ? Héritage du parcours de formation ? de l'expérience professionnelle ? de contraintes organisationnelles ? Nous avons réduit les voix des managers aux buts qu'ils fixaient à leurs équipes, mais ces représentations mériteraient elles aussi d'être investiguées. Les études qui portent sur les opinions des décideurs (par exemple (Condé et Ferguson 2023)) apparaissent plus nombreuses que celles qui portent sur des situations de travail observées directement, certes, mais elles ne rendent pas nécessairement compte de la façon dont elles sont propagées dans les services. Pour le dire plus scientifiquement, nous n'avons ainsi pas été capables d'établir un lien de cause à effet clair entre la formulation de promesses par les acteurs socio-économiques, et leur apparition dans la bouche des décideurs industriels. Des entretiens plus ciblés sur ces questions permettraient sûrement d'investiguer ces transferts de promesses du débat public vers l'industrie. Parmi les pistes déjà identifiées figure le rôle des consultants de cabinets de conseil dans « l'évangélisation technologique » de leurs clients, auprès desquels ils assurent une promotion facturée des nouvelles technologies (Bertrand 2023).

3. Perspectives de recherche : l'IA dans l'industrie, et après ?

En arrivant quasiment au terme de ce manuscrit, nous faisons face à la même ambiguïté que les ingénieurs de l'équipe IA au moment de la première *release* du ClassifiMotif : certes, c'est la fin d'une partie du projet, mais il annonce encore beaucoup d'étapes à venir. Ce n'est que le début, pour ainsi dire.

Le déploiement de l'IA se poursuit progressivement. De premières enquêtes sur l'IA générative dans le contexte professionnel ont été recoupées par F. Barcellini (2024) et ses collègues, voir (Tableau 13)[356]. L'équipe de chercheurs montre que les gains en productivité escomptés peuvent se vérifier mais sont loin d'être systématiques. Nombre d'autres problématiques dans l'organisation et l'expérience du travail sont aussi identifiées : perte de sens, affaiblissement de l'apprentissage et du collectif, accroissement de l'interruption du travail.

	Effets positifs	**Effets négatifs**
Performance	Gains en productivité, en temps...	… pas systématiques
Contenu des tâches		Transformation du travail vers des tâches de vérification, de correction
Attention	Un « filet de sécurité » : moins de charge cognitive	Interruptions, perturbations du flux du travail
Compétence	Bénéfice pour les travailleurs les moins qualifiés	Risques de déqualification Entrave à l'apprentissage du travail
Transparence		Difficulté à comprendre les résultats du système Confiance excessive dans les résultats
Sens au travail		Disparition de tâches porteuses de sens
Dimension collective du travail		Affaiblissement du travail collectif

Tableau 13 : Synthèse des effets de l'intégration de l'IA générative à partir d'une revue de (Barcellini et al., 2024).

Les résultats de F. Barcellini et ses collègues (2024) font largement écho à nos propres observations au sein de l'industrie du semiconducteur. Ils cristallisent certains des regrets qui subsistent à la fin de cette étude, qui n'a pas pu explorer en profondeur les modalités d'usage dans le temps des systèmes d'IA observés. Que devient le ClassifiMotif une fois qu'il est intégré aux pratiques routinières des techniciens ? Son énaction par les utilisateurs conduit-elle à des phénomènes similaires ? et dans quelles proportions ? Ces questions méritent d'être posées pour comprendre comment ces systèmes sont intégrés sur le temps long dans les organisations. Les observations *in situ* de situations d'utilisation de systèmes d'IA devront continuer à être menées pour évaluer, au-delà de la prospective, au-delà de la réclame, les véritables conditions d'utilisation de ces systèmes. De telles études à long terme, basées sur des éléments qualitatifs au plus près de l'expérience de travail, restent nécessaires pour comprendre les transformations des organisations.

L'une des trouvailles majeures de cette thèse, en filigrane, est de n'avoir rien trouvé de particulièrement exceptionnel dans le déploiement de l'IA dans l'industrie par rapport à ce que peuvent produire les

[356] Ce tableau, qui synthétise les résultats de l'étude de F. Barcellini et ses collègues (2024), a d'abord été réalisé avec Chloé Bonifas dans le cadre du cours public *La société au défi de l'IA* en partenariat avec la Société alpine de Philosophie et la bibliothèque municipale de Grenoble (13/05/2025).

différentes littératures sur le changement technologique nous avons consultées. Les systèmes d'IA sont des technologies à part entière comme les autres. Ce constat offre l'opportunité de développer l'une des propositions de recherche formulées par P. Leonardi et S. Barley (2010:41) : « Désormais, la tâche qui nous incombe est d'expliquer pourquoi il y a si peu de variance dans la façon dont les technologies sont utilisées, ou, plus précisément, pourquoi les technologies semblent secouer les ordres sociaux au sein de champs institutionnels selon des directions plus ou moins concordantes. Pour ce faire, il faudra reconnaître que l'on ne doit pas jeter le matérialisme avec l'eau du déterminisme ; que des acteurs puissants peuvent cadrer le déploiement technologique au travers des institutions qu'ils habitent ; et que les analystes ne peuvent pas expliquer de façon adéquate les dynamiques micro-sociales de changement technologique sans considérer les processus macro-sociaux de changement technologique (et vice versa)[357]. » Les auteurs poussent ainsi à qualifier les processus de changement technologique en termes de discours, de pouvoirs et d'institutions. Nous avons tenté de défricher certains de ces aspects, en particulier dans le premier chapitre, mais ils mériteraient bien entendu d'être approfondis.

Au terme de la thèse, d'autres questions restent en suspens et méritent à notre sens d'être investiguées :

- Qu'en est-il de l'IA générative ? Dans quelle mesure la production de langage, de contenu audiovisuel, peut-elle altérer les modalités de travail ? Et en quoi cela serait-il différent de dispositifs de classification ou de décision ? Il est encore difficile de statuer sur les situations dans lesquelles ces dispositifs pourront être employés dans les années à venir[358], d'autant qu'ils peuvent faire l'objet de contestations vives. Contrairement aux projets qui ont été décrits dans cette thèse, les systèmes d'IA générative paraissent être plus susceptibles de s'infiltrer *par le bas* des organisations (Ferguson 2025a). Ces irruptions particulières dans le travail engagent probablement des mécanismes bien différents qui seront sans nul doute passionnants à observer.

- Comment des formes de négociation soutenues peuvent-elles orienter le déploiement des systèmes d'IA ? L'un des cas recensés par C. Tassinari (2024) et ses collègues rend compte de dynamiques intéressantes de préservation explicite de certaines activités de travail, à la suite d'un processus de consultation collective. Il serait intéressant d'aller examiner la façon dont les collectifs de salariés (formels ou non, syndiqués ou pas) peuvent infléchir l'introduction de l'IA dans leur organisation.

- Après stabilisation, dans quelle proportion le travail industriel peut-il réellement être automatisé par des systèmes d'IA ? Quelle part du travail préexistant subsiste-t-elle telle quelle, quelle part est transformée ou déplacée ? Il est clair qu'il y aura autant de réponses à ces questions que de cas d'observation puisque les facteurs organisationnels tiennent une place importante dans ces évolutions. Pour s'y intéresser, il faudra pouvoir évaluer des changements, et donc être en mesure

[357] « The task now at hand is to explain why there is so little variance in how technologies are used or, more precisely, why technologies eventually seem to shift social orders within an institutional field in more or less consistent directions. To do so will require acknowledging that one need not jettison materialism along with determinism, that powerful actors can shape technological momentum through the institutions they inhabit, and that analysts cannot adequately explain the micro-social dynamics of technological change without considering the macro-social processes of technological change (and vice versa) » (notre traduction).

[358] La thèse d'Antonin Chéron, en cours, témoigne par exemple de la mise en œuvre de systèmes d'IA générative dans le secteur du nucléaire.

de décrire des situations antérieures et postérieures aux déploiements. Il faudra aussi rendre compte de la façon dont ces changements affectent, positivement ou négativement, l'expérience de travail.

- Alors que les problématiques environnementales liées à la numérisation et en particulier à l'IA commencent à être bien identifiées (Alves Da Costa et Welgryn 2025), comment les doubles enjeux numérique et écologique sont-ils conjugués dans l'industrie ? Il serait pertinent d'investiguer les articulations (ou absences d'articulations) entre ces problèmes, et d'observer les arbitrages qui sont menés.

4. Epilogue : pour une éthique du déploiement technologique

La démarche sociologique a ça d'exaltante qu'elle encourage à explorer avec finesse la complexité des phénomènes sociaux pour mieux en tirer des explications sur le fonctionnement des relations entre les individus et leur environnement. Hélas, c'est aussi de là que peut émaner une certaine frustration. Que faire de ces constats ? et quelle serait la marche à suivre ? Il ne revient pas forcément au sociologue de s'atteler à ce chantier tout aussi conséquent. Nous estimons pourtant nécessaire de pousser la réflexion un dernier cran plus loin, histoire de tirer quelques leçons des constats qui ont été dressés. C'est pourquoi, par un tour de passe-passe assumé, nous enfilons l'espace des derniers paragraphes un atour normatif au travers d'une appréciation plus éthique du déploiement de l'IA dans les organisations.

4.a. Morale et changement technologique

L'éthique se donne pour objectif d'évaluer la conduite à tenir sur le plan moral. Lorsque l'on s'intéresse au déploiement te technologies comme l'IA, il ne s'agit pas de définir des technologies éthiques ou des organisations éthiques *en soi*, mais plutôt d'envisager des réflexions éthiques, au sens où ces réflexions sont porteuses d'un discours sur la meilleure voie à suivre pour guider l'action. La philosophie morale s'inscrit dans d'ancestrales traditions de pensée, desquelles on peut grossièrement dégager trois écoles : conséquentialisme, déontologisme, arétaïsme. Pour dessiner ce panorama à grands traits, les conséquentialistes pensent en termes du résultat de leurs actions, les déontologistes selon des grands principes à suivre absolument, tandis que les arétaïstes se conforment aux vertus ou aux valeurs qui leurs paraissent cardinales – on pourra parler d'axiologistes dans ce dernier cas. Des débats millénaires engagent les partisans de ces positions et de leurs déclinaisons.

L'ambition de l'éthique que nous défendons est celle d'une expression normative, mais qui ne soit pas nécessairement injonctive. Selon cette posture, la démarche éthique ne peut être plaquée verticalement depuis une tour d'ivoire. Bien au contraire, elle est le résultat émergent d'une réflexion collective alimentée par des considérations morales. Plutôt que de dire explicitement quoi faire, l'éthicien peut proposer des pistes de résolution qui incomberont ultimement aux acteurs concernés.

Mais où donc se niche la morale dans les projets de déploiement technologique ? Les transformations auxquelles contribuent ces technologies, comme l'IA, n'ont finalement rien de révolutionnaire au sens où

pouvaient l'entendre K. Schwab et les participants à la foire d'Hanovre de 2011. Pour autant, ce n'est pas parce que ces changements s'inscrivent dans une tradition de l'automatisation du travail, de la numérisation des activités et des moyens de communication entre salariés, qu'ils sont bénins. De nombreux aspects de la vie des travailleurs sont affectés : contrôle du travail, reconfiguration de l'activité, et donc rapport au temps, au travail, aux collègues, qui viennent s'immiscer jusque dans la vie personnelle. Les managers ont depuis bien longtemps compris que ces changements pouvaient occasionner des difficultés sur le plan psychologique. L'une des réponses à cette prise de conscience a été d'assimiler les réactions aux changements organisationnels à des situations de deuil (Pailot 2014). Plutôt que de prendre la mesure d'une telle métaphore, ces modèles ont plutôt encouragé la normalisation de ces souffrances. Au-delà de ces positions relativement caricaturales, des littératures abondantes en conduite du changement ou en ergonomie ont cherché à rendre le changement technologique moins douloureux, signe que le bien-être dans l'expérience de travail n'a pas non plus totalement été ignoré.

Forts de ce constat, par où la réflexion éthique sur le changement technologique en lien avec l'IA dans le travail pourrait-elle commencer ? En vérité, elle pourrait se prendre par les deux bouts, aussi bien depuis les débats sur le travail que ceux sur l'IA dans l'espace social. En pratique, pourtant, ces deux bouts semblent avoir des difficultés à se joindre.

4.b. L'organisation du travail comme impensé des débats contemporains…

… sur le travail

Dans un entretien donné à la revue *Mouvements*¸ C. Dejours (2021:27) s'interroge : pourquoi l'organisation du travail est-elle un impensé politique ? C. Dejours constate et déplore l'absence d'un débat public sur les modalités de l'organisation du travail, au-delà des questions, tout aussi importantes, de l'emploi ou des conditions de travail. Le mouvement de protestation contre la réforme des retraites de 2023 a pu mettre en exergue certaines problématiques jusque-là mises entre parenthèses : pénibilité du travail, état de santé à l'âge de la retraite, disparités entre classes sociales. Dans ce débat, la technique, pourtant plus mobilisée que jamais pour médier et encadrer le travail, a brillé par son absence.

Dès le XIXè^{me} siècle, cette mise en avant des conditions de travail, au détriment de son organisation, est pour C. Dejours l'expression d'une priorisation de l'urgence, en tâchant d'assurer avant tout « la protection des corps » (2021:29). L'auteur explique comment, en parallèle du délaissement de la question de l'organisation du travail de la part du mouvement ouvrier, les dirigeants ont, quant à eux, creusé la question en profondeur. L'organisation scientifique du travail industriel dans ses déclinaisons taylorienne et fordiste en est l'un des résultats. Ces constats se prolongent aujourd'hui dans les propositions de la quatrième révolution industrielle, en dépit des promesses d'horizontalité qui ont pu être émises (Vereycken et al. 2021). Dans l'idéal de l'*Industrie 4.0* on voit par exemple ressurgir le principe fordiste d'une cadence imposée au travers du transport des produits par des véhicules auto-guidés. A SemiCorp, au-delà des activités de production, le contrôle qualité lui-même est soumis à ces contraintes temporelles par le transport automatisé des lots. Certes, la cadence ne s'impose pas directement au corps des travailleurs. Cependant elle se cristallise par la mise en visibilité d'indicateurs de performance (*combien de lots bloqués en attente de machines libres ?*) qui peuvent conduire à une

demande de rapidité dans le travail, et donc à générer stress et inconfort qui ne font pas l'objet d'une prise en chage.

Le rôle des nouvelles technologies est décisif dans l'établissement de nouveaux régimes de la perception du travail ou de sa temporalité, ainsi que dans la répartition du travail au sein des services. Mais ces débats restent un cheval de bataille des sciences sociales et peinent à s'exporter en dehors du cadre académique.

… sur l'IA

Le déploiement de l'IA a de son côté suscité de nombreuses controverses, qui ont donné naissance à une littérature abondante dans un nouveau champ dédié, l'éthique de l'IA[359]. Dérivée de la philosophie morale dont elle emprunte les piliers théoriques, l'éthique de l'IA vise à produire une réflexion double sur (1) la *meilleure* façon de produire les technologies d'IA et sur (2) la façon de produire les *meilleures* technologies d'IA. L'interprétation normative de ce que serait ce « meilleur » est au cœur des débats philosophiques entre conséquentialisme, déontologisme et arétaïsme (Ogien et Tappolet 2008).

L'éthique de l'IA peut être divisée en plusieurs arènes normatives, suivant les objets et les parties prenantes auxquelles elle s'intéresse (Ménissier 2023). Elle reste aujourd'hui dominée par ce que T. Ménissier (2023) appelle « l'éthique informatique », dont l'approche « repose […] sur la détermination de concepts qui sont également des valeurs dont on attend qu'elles guident l'écriture du code, et par suite permettent, si l'on peut risquer cette expression, de rendre les algorithmes plus éthiques » (Ménissier 2023:4). L'éthique informatique vise ainsi à promouvoir un ensemble de concepts, que l'on retrouve dans les documentations fournies par les états, les organisations non-gouvernementales : équité, transparence, responsabilité, bienfaisance (Jobin et al. 2019). Souvent mal définis, ces concepts ont une opérationnalité relativement limitée (Munn 2023). Est-ce un *bug* ou une *feature ?* L'éthique de l'IA a été largement infiltrée par les géants du numérique, qui financent de nombreuses recherches et conférences (Abdalla et Abdalla 2021). Leur objectif, dans la lignée des grandes firmes du tabac, est de cadrer les débats selon les directions qui leur sont les plus opportunes (Abdalla et Abdalla 2021). Le thème des discriminations systémiques, mis en lumière par des travaux montrant les dérives racistes des dispositifs algorithmiques (Angwin et al. 2016; Buolamwini et Gebru 2018), a par exemple été réduit à la résolution de biais (Davat 2023). Le problème est ainsi mathématisé et la problématique dépolitisée.

En se réunissant autour de grands principes, l'éthique informatique paraît d'abord s'inscrire dans la lignée de la pensée arétaïque (l'éthique des vertus) d'Aristote ou d'E. Anscombe ([1958] 2008). En réalité, les grands principes de l'éthique de l'IA sont traduits en variables quantifiées, et se fondent dans l'idéal conséquentialiste qui vise à l'optimisation mathématique, en dehors de toute considération morale partagée (Ménissier 2023). Le constat se prolonge jusque dans les organisations où l'exigence d'explicabilité, par exemple, reste inféodée à des logiques de performance (Vuarin et Steyer 2023). Le champ de l'IA explicable paraît plutôt soutenir le déploiement de l'IA qu'en constituer un véritable contrepoint (Berkouk et al. 2025).

[359] L'introduction de la thèse de G. Pistilli (2024) propose un état de l'art concis du champ de l'éthique de l'IA et de ses courants. Au cœur d'une actualité mouvante, il est encore en cours de structuration.

Blâmée pour son « inutilité » (Munn 2023) et sa subordination aux marchés de l'innovation (Steinhoff 2024), l'éthique de l'IA montre ainsi ses limites pour ce qui est de fournir une critique opérationnelle et un plan d'action pour le développement de dispositifs utiles et bons pour la société. Sans véritable pouvoir (Rességuier et Rodrigues 2020), l'éthique de l'IA se distingue ici du droit en tant qu'elle n'est pas restrictive. En France par exemple, la réflexion éthique sur l'IA est l'une des missions du Comité National Pilote d'Ethique du Numérique (CNPEN) dont les avis n'ont qu'une valeur consultative.

Lors d'une conférence donnée à Grenoble, T. Ménissier (2019) note de façon réflexive que lors des discussions sur l'éthique de l'IA, le philosophe est le plus souvent appelé à s'exprimer en dernier, comme si son rôle était de clore le débat. Si la remarque peut faire sourire, elle est aussi révélatrice d'une absence de la réflexion éthique au cours des projets de conception, sur un mode processuel (Pardoux et Devillaine 2022). Tant et si bien que ce n'est qu'à la fin de ces projets qu'est convoquée une forme de pensée critique qui ne peut que constater les directions prises par les acteurs, sans pouvoir effectivement interroger leurs logiques.

L'éthique de l'IA pourrait alors être condamnée à rester une « petite éthique » (Hunyadi 2015), c'est-à-dire une critique de surface à peu de frais, vaguement réformiste. Les éthiciens, soumis à l'adoucissement de leurs propositions conceptuelles face aux intérêts économiques de l'industrie de la *tech*, deviennent porteurs malgré eux d'une éthique d'accompagnement, laquelle sert de caution morale à des projets d'innovation peu réflexifs, qui ne prennent pas en compte de véritable réflexion systémique.

Des angles morts subsistent encore, aussi bien du point de vue de l'éthique de l'IA que de ses critiques. Ils résident notamment dans la négligence de la question du travail aussi bien que de son organisation. Ces thématiques sont encore largement laissées de côté. Si les promesses sur le travail ont pu engager des discussions collectives, celles-ci se sont révélées caricaturales en ne prenant pas en compte la réalité du travail au contact de ces dispositifs (**I.**2.c). L'organisation du travail, en ce sens, reste aussi un impensé de l'éthique de l'IA.

4.c. Concevoir le changement technologique comme un enjeu éthique

Intégrer la transformation du travail dans la réflexion éthique ?

Des propositions émergent en faveur d'une prise en compte du travail comme enjeu éthique à part entière dans le déploiement de l'IA. Les études du DiPLab ont permis de mettre en lumière les conditions de production internationales et précaires de l'IA, voir par exemple (Le Ludec et al. 2023; Tubaro et al. 2025, 2020). Si ces études remarquables ont été remarquées, c'est aussi parce qu'elles se sont accompagnées d'un important travail de dissémination[360]. Alors que la prise en compte des enjeux éthiques se concentre encore sur les points de vue du Nord global, une éthique « d'un bout à l'autre » mérite d'aller interroger, apprécier, et protéger les droits des micro-travailleurs, dont beaucoup ne vivent pas dans ces pays (Casilli

[360] Illustré par exemple par la diffusion d'un film documentaire dédié en première partie de soirée sur le service public, *Les Sacrifiés de l'IA*, réalisé par H. Poulain, co-écrit notamment par A. Casilli.

2024). L'élargissement proposé par A. Casilli vise ici à intégrer la question du travail dans l'éthique de l'IA.

Aller « d'un bout à l'autre » encourage à explorer en aval autant qu'en amont le déploiement de ces technologies. Ce que nous entendons ici comme *l'aval* correspond aux usages et conditions d'usage de l'IA. La prise en considération des usages de l'IA apporte un regard supplémentaire sur les efforts qui pèsent sur ses producteurs. Pour le dire autrement, enquêter sur ce à quoi sert véritablement l'IA permet aussi de questionner les coûts environnementaux et sociaux dépensés pour fabriquer des technologies encore largement fondées sur des mécanismes extractivistes et néocolonialistes (Crawford 2023; Lebrun 2024).

L'une des pistes à développer en ce sens, comme le propose T. Ménissier (2023), est l'élaboration d'une éthique des usages de l'IA. Celle-ci se fixerait trois objectifs : « premièrement, […] déterminer les finalités et les valeurs de l'IA par la considération de l'emploi des systèmes d'algorithmes à travers l'observation méticuleuse de cas d'usages (*Use Case*) ; deuxièmement, […] comprendre les conditions (psychologiques, économiques et politiques) fondatrices de ces usages ; troisièmement, […] accompagner et […] évaluer la redéfinition de l'activité humaine impliquée par l'adoption des systèmes d'algorithmes » (Ménissier 2023:14). La proposition vise ainsi à se questionner sur les causes et les motivations de l'innovation en posant d'abord une question relativement simple : *de l'IA, mais pour quoi faire ?* Elle ambitionne aussi, et c'est l'une des implications du point numéro trois, d'interroger les modalités de la reconfiguration du travail à l'aune du déploiement de systèmes complexes. Si la démarche est relativement originale compte tenu de la littérature scientifique actuelle, elle n'est pas non plus étrangère à certaines des propositions qui ont déjà pu être formulées. Par exemple, un avis du CNPEN (2022), qui concerne les systèmes d'IA pour le diagnostic, intègre explicitement les enjeux d'intégration du résultat algorithmique dans sa revue éthique de ces dispositifs.

L'observation du travail comme prérequis à la réflexion éthique sur l'IA au travail

A défaut d'une attention portée aux sociologies des organisations ou du travail, seule l'observation du travail réel, *in situ*, peut permettre d'aboutir à des réflexions fructueuses sur les transformations effectives du travail. L'exemple de SemiCorp est particulièrement parlant. Certaines valeurs considérées *a priori* comme importantes dans la littérature ne font pas l'objet d'un intérêt en interne, quand d'autres, absentes des grands rapports, sont pourtant essentielles aux yeux des salariés.

Les exemples décrits dans la thèse sont assez évocateurs de ce point de vue. Dans les situations de travail que nous avons rapportées, la transparence et l'explicabilité des systèmes d'IA ne revêtent que peu d'intérêt aux yeux des ingénieurs comme des techniciens. Tant qu'ils sont capables de construire du sens dans les résultats des dispositifs utilisés – on peut ici penser aux travaux de K. Weick et ses collègues (2005) sur le *sensemaking* –, cette transparence n'est pas recherchée par les salariés. Pourtant, cette valeur cardinale a sans doute beaucoup d'importance dans d'autres secteurs et notamment pour des applications de service public (Guillaud 2025).

A l'opposé, la proximité physique avec la production ou la compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre semblent tenir à cœur de nombreux salariés alors que ces dispositions ne sont pas évoquées (à notre connaissance) dans les écrits sur l'éthique de l'IA dans le travail. Le philosophe et mécanicien M.

Crawford (2010) a pourtant montré les bienfaits de l'activité manuelle – intellectuellement exigeante – et de la proximité aux choses dans le travail. Le rapport à la matérialité reste une variable de la satisfaction au travail.

Parvenir à ces conclusions est difficile à anticiper sans aller à la rencontre des salariés concernés. Pour y parvenir localement, il apparaît central d'impliquer l'ensemble des travailleurs dans le processus d'évaluation éthique, qu'ils soient managers, concepteurs ou utilisateurs de ces technologies. C'est à ce prix qu'une véritable réflexion éthique pourra émerger.

Une éthique de la discussion dans le changement technologique

L'éthique de la discussion développée par J. Habermas ([1983] 1999) est ici féconde pour alimenter la construction d'un cadre éthique collectif pour le développement technologique au sein des organisations. J. Habermas propose de se départir de l'impératif catégorique d'I. Kant ([1785] 1993), l'un des plus fervents représentants du déontologisme. Chez I. Kant, l'impératif catégorique permet d'établir des principes moraux pour guider l'action[361]. Ces grands principes visent une portée universelle. Mais comment peut-on, depuis un point de vue local, situé, prétendre à l'universalité ? C'est l'un des problèmes que note J. Habermas[362]. Son éthique de la discussion a pour ambition d'établir des normes, suivies par un collectif, sur la base d'un consensus partagé. Pour le philosophe, un tel consensus n'est cependant valide qu'à la condition d'une connaissance commune des perspectives, des intérêts et des contraintes de l'ensemble des parties prenantes. D'une certaine manière, par ce geste, J. Habermas tente de réconcilier éthique déontologiste et éthique des vertus, en suggérant aux collectifs d'établir leurs propres normes, selon les principes et les valeurs qui leur paraissent les plus importantes.

Dans les organisations, la discussion entre les acteurs offre la possibilité de l'expression d'une diversité de points de vue sur ces dispositifs. Face à la difficile prise en compte des enjeux éthiques sur le terrain, une étude sur le déploiement de systèmes d'IA génératives dans des organisations françaises conclut en ce sens que « la normativité éthique doit passer l'examen des situations pratiques auxquelles concepteurs ou conceptrices et utilisateurs ou utilisatrices sont confronté·e·s » (Tassinari et al. 2024:16). On voit comment, à l'échelle des organisations, une éthique du changement technologique ne peut exister qu'au sein d'un débat collectif, alimenté par l'ensemble des parties prenantes des projets investigués, usagers y compris. Le récit du travail actuel, la prise en compte du travail de conception et l'explicitation des contraintes productives offrent un moyen d'engager un processus de réflexivité.

Pour reprendre la taxonomie élaborée par P. Leonardi et S. Barley (2010), l'analyse collégiale des « perceptions » des technologies, de leur « énaction » *in situ*, et des « reconfigurations » du travail peut conduire à favoriser la conduite de projets bénéfiques à l'ensemble des échelons de l'organisation, et idéalement, à celle de la société plus généralement. La mise en lumière du « conflit de rationalité » et sa

[361] « Agis uniquement d'après la maxime qui fait que tu puisses vouloir en même temps qu'elle devienne une loi universelle. »

[362] « Seul est impartial le point de vue à partir duquel sont universalisables les normes même qui, parce qu'elles incarnent manifestement un intérêt commun à toutes les personnes concernées, peuvent escompter une adhésion générale et gagner, dans cette mesure, une reconnaissance intersubjective. Par conséquent, la formation impartiale du jugement s'exprime dans un principe qui contraint *quiconque* est concerné à adopter, suite à une délibération sur les intérêts, la perspective de *tous les autres*. » (Habermas [1983] 1999:86).

résolution, le « compromis de rationalité » (Borel et al. 2024a), sont en cela des opportunités d'introduire la perspective de J. Habermas dans les projets de changement technologique.

4.d. Démocratie au travail et technologie

Démocratiser le changement technologique en entreprise ?

Face aux enjeux économiques qui gouvernent l'introduction de l'IA, quelle place ces réflexions peuvent-elles véritablement trouver ? Le conflit de rationalité à l'œuvre dans les organisations, et d'autant plus dans les grandes entreprises, reste largement asymétrique. Alors qu'à SemiCorp – comme ailleurs –, les projets de déploiement de systèmes d'IA visent avant tout à automatiser le travail ou à en augmenter la productivité, il n'est pas certain que les conditions soient réunies pour favoriser le bien-être des travailleurs ou satisfaire leur quête de sens. O. Chagny et N. Blanc (2024:199) constatent à ce titre l'impuissance des salariés à faire valoir leurs préoccupations concernant l'IA : « Les représentants des travailleurs haussent de plus en plus le ton pour faire valoir leurs droits à l'information et à la consultation dans le cas de l'introduction de systèmes d'IA. Mais ils font face à des difficultés majeures et sont très souvent mis à l'écart des processus de décision sur le plan des aspects techniques, des critères utilisés, des données collectées et, plus encore, de la nature et du rôle des algorithmes[363]. » Une éthique de la discussion appliquée au changement technologique n'est pourtant possible que si chacun des acteurs impliqués se sent également concerné par les perspectives des autres acteurs.

Déplorer le manque de participation des salariés aux processus de changement technologique vient convoquer un débat plus large sur la possibilité de l'expression démocratique en entreprise. Engagé dans une proposition d'élaboration théorique de la démocratie en entreprise, R. Jardat (2012) montre qu'il existe un continuum de pratiques de participation à la vie d'une organisation. Toute entreprise privée n'est pas une dictature, toute coopérative n'est pas un paradis démocratique. Toujours est-il que le changement technologique en entreprises fait aujourd'hui peu l'objet de débats – aussi bien en leur propre sein que dans le débat public. Les motivations qui sous-tendent le déploiement de l'IA et les modalités de sa mise en œuvre sont encore rarement discutées.

Un exemple : la « codétermination » allemande

Le mandat confié aux entreprises d'une contribution économique à la société justifie-t-il l'absence de débat sur les moyens techniques de production, et sur les effets organisationnels de leur intégration ? Tous les pays ne gèrent pas ces questions de la même manière. En Allemagne, par exemple, les syndicats ont historiquement une place importante au sein des entreprises, dont ils investissent la gouvernance (Dribbusch et Birke 2019). Les « comités d'établissement » (équivalents des Comités Sociaux et Économiques (CSE) français) sont indépendants des syndicats mais sont constitués de représentants du personnel élus et en majorité syndiqués. Ils s'impliquent dans la négociation collective aussi bien que dans la gestion des affaires propres à leur entreprise. Dans les grandes entreprises, les

[363] « Workers' representatives are increasingly raising their voice to assert their information and consultation rights in the case of the introduction of AI systems. But they face major difficulties and are very often being left out of the AI decision-making process in terms of the technological aspects, the criteria used, the data collected and, even more so, in the nature and role of the algorithms » (notre traduction).

« conseils de surveillance », réunissent aussi bien des actionnaires que des salariés pour participer à la prise de décisions de l'entreprise, en parallèle des conseils d'administration. La « codétermination », cette participation active des salariés aux décisions des entreprises, est une composante clé du modèle allemand, bien qu'elle fasse l'objet d'un effritement récent (Dribbusch et Birke 2019).

En vertu de ce positionnement clé, les syndicats allemands prennent position sur les modalités du changement technologique. Dans le cadre des projets de transformation numérique des industries allemandes, les syndicats IG Metall et ver.di ont engagé des discussions collectives sur les modalités d'introduction des technologies de l'*Industrie 4.0* (Dribbusch et Birke 2019). Le projet *Arbeit 2020 (*Travail 2020), débuté en 2016, a été l'occasion pour trois grands syndicats (IG Metall, IG BCE et NGG) de mener une vaste opération de sensibilisation aux enjeux de la numérisation dans les entreprises allemandes (Haipeter 2020). L'objectif y a été de former les membres des comités d'établissement aux enjeux liés aux technologies numériques et de leur donner des éléments de négociation. A l'issue de ce projet, les résultats se sont montrés globalement positifs au sein des entreprises investiguées (Haipeter 2020). La participation des salariés a été importante, et le projet a permis de réunir des services qui n'étaient pas représentés jusqu'ici au sein des comités d'établissement. Le nombre d'emplois n'a pas diminué, au contraire, tandis qu'une partie du travail a été transféré des activités de fabrication vers des rôles administratifs. La demande en compétences s'est généralement accrue, même si elle a pu être dégradée par endroits. En revanche, T. Haipeter note que la charge de travail a globalement augmenté dans les entreprises concernées, et qu'elles ont eu des difficultés à répondre aux besoins de formation croissants. L'auteur note que ces effets ne sont pas nécessairement à attribuer au changement technologique dans des contextes de restriction budgétaire et d'effectifs resserrés.

Tout l'intérêt du projet *Arbeit 2020* a été de fournir des clés de lecture aux membres des comités d'établissement afin qu'ils puissent identifier ce type de problématiques bien connues de la sociologie des organisations. A partir de ces constats, les élus salariés seraient capables d'établir des stratégies collectives afin de parvenir à la résolution de ces problèmes. En ce sens, la stratégie des syndicats allemands s'est centrée sur l'accompagnement du changement, en opposition à une voie de résistance plus frontale (Kahmann 2021). Certes, cela n'a pas suffi à enrayer les désagréments pour le travail liés à des changements technologiques qui restent motivés économiquement (Haipeter 2020).

Quelle stratégie est la meilleure du point de vue des travailleurs ? Comme nous défendons une éthique normative mais pas injonctive, nous nous garderons bien de trancher. La formation reste en tout cas, il nous semble, une voie privilégiée pour donner à chacun l'opportunité d'agir de façon éclairée. Il est possible d'imaginer la production de supports d'information à destination des salariés concernant l'IA, objet dont les soubassements sociotechniques sont encore nébuleux pour beaucoup. C'est notamment l'objet d'un projet coordonné par l'association grenobloise Le Fil Rouge.

4.e. Quelles voies pour les salariés pour le futur de l'IA dans le travail ?

La piste du dialogue social technologique

Pour conceptualiser les modalités des négociations sur le changement technologique liées à l'IA, la notion de « dialogue social technologique » a été mise en avant, notamment dans le cadre du projet DIAL-IA[364]. Le dialogue social avait déjà été mentionné par C. Villani et ses collaborateurs (2018:118) dans leur rapport rendu au gouvernement français, comme un moyen « [d']anticiper et maîtriser les impacts sur l'emploi et le travail », sans que ce point ne soit particulièrement retenu dans les priorités de l'action publique. Le dialogue social technologique se définit comme l'ensemble des négociations, consultations et échanges qui prennent place entre les entreprises et leurs salariés, à l'échelle locale, nationale ou internationale, à propos des technologies au travail (Chagny et Blanc 2024). Le dialogue social technologique s'inscrit dans une dynamique de participation, voire de co-construction (Bernoux et Gagnon 2008). Il repose en cela sur l'investissement des collectifs de travailleurs, et notamment des syndicats.

En France, l'intérêt des syndicats pour ces questions est croissant mais reste marginal. Les accords sur l'IA négociés au sein des entreprises sont en hausse, et concernent essentiellement les enjeux liés à l'emploi, et moins à l'organisation du travail (Greenan, Napolitano, et Pillosio 2024). De plus en plus d'organisations syndicales se positionnent sur le thème de l'IA dans le travail (Chagny et Blanc 2024). Citons par exemple, FO-Cadres (2023), qui a retenu, au-delà de l'emploi, des enjeux autour de la santé, du management, de la liberté et des valeurs. Le dialogue social est perçu dans le rapport de FO-Cadres comme une piste de solution pour engager un débat sur la dimension éthique du déploiement de ces technologies. Pour y parvenir, de nombreuses propositions sont formulées : le renforcement des compétences en IA des instances représentatives du personnel (les CSE par exemple), l'adoption d'un principe de précaution sur des usages de l'IA identifiés en interne comme risqués (pour la vie privée, pour l'équité devant le recrutement), la systématisation des études d'impact, ou encore la réversibilité du déploiement de systèmes d'IA suite à des expérimentations – en d'autres termes, se laisser la possibilité de renoncer au déploiement de ces dispositifs lorsqu'ils ne sont pas adaptés aux situations de travail.

L'hypothèse d'un dialogue social technologique profitable aux salariés prête cependant le flanc à des attaques attendues dans un contexte d'économie capitaliste. Qu'y a-t-il vraiment à gagner pour les salariés ? et comment obtenir ces bénéfices ?

Un tel débat sur les pratiques de négociation des technologies fait écho à ceux qui ont eu lieu dans les années 1970 autour de l'informatisation du travail (Barret-Bertelloni, Gourlet, et Tréguer 2025). L'analyse des controverses syndicales réalisée par ce groupe de chercheurs révèle des archives saisissantes de modernité. Entre la Confédération Générale du Travail (CGT) et la Confédération Française Démocratique du Travail (CFDT), deux pistes sont esquissées pour aborder la question de l'informatisation. Plusieurs fédérations de la CGT, convaincues du potentiel libérateur de ces nouvelles technologies, appuient par exemple les politiques industrielles en faveur de l'informatisation. Lorsque ces dispositifs sont imposés à marche forcée, les auteurs notent que la réponse de la CGT tient dans des

[364] Voir le site *https://dial-ia.fr/*. Le projet a été porté par l'Institut de Recherches en Etudes Sociales (IRES), co-financé par l'Agence National pour l'Amélioration des Conditions de Travail (AACT) et nombreuses organisations syndicales y ont contribué.

contre-propositions intégrant les systèmes informatisés autrement (pour favoriser l'autogestion notamment), mais les intégrant quand même. A la CFDT, l'heure est plutôt à la défiance, les militants sont sceptiques vis-à-vis des potentialités démocratiques de ces technologies, contre lesquelles ils luttent massivement. Quel que soit leur bord, les syndicalistes font grève et obtiennent quelques victoires. Pour autant, au tournant de l'élection de François Mitterrand en 1981, les syndicats sont progressivement poussés vers des politiques de cogestion ; la négociation est limitée et l'informatique s'immisce partout dans les entreprises (Barret-Bertelloni et al. 2025).

De la négociation au conflit

Pour certains syndicalistes dès lors, le dialogue social technologique, qui serait à construire dans un rapport de force trop déséquilibré, semble voué à l'échec[365]. C'est pourquoi des initiatives d'opposition pure et simple à ces technologies peuvent fleurir. Il ne s'agit pas nécessairement d'un rejet en bloc de l'IA en tant que technologie[366], mais plutôt d'un calcul sur ce qui serait à gagner pour les salariés. La résolution de l'équation aboutit, chez ces syndicalistes, à l'impossibilité (1) d'obtenir des gains substantiels au travail grâce à l'IA, tout en (2) évitant des pertes redoutées : chômage, dégradation des conditions de travail, transformation défavorable des tâches, perte d'autonomie. Devant ces prédictions, ces syndicalistes considèrent dès lors qu'il est plus fructueux pour eux de refuser inconditionnellement le déploiement de ces systèmes.

Dans certains cas, la situation imposée aux salariés les pousse en effet à la lutte. Les salariés d'Onclusive, entreprise française spécialisée dans la production de documents de veille médiatique, se sont par exemple levés contre un projet de licenciement, annoncé en septembre 2023. Ils ont protesté contre la reprise de leur travail par des systèmes d'IA jugés « plus rapide[s] et plus fiable[s] » (NG 2023). En réalité, l'IA y est apparue comme le prétexte pour une délocalisation des activités à Madagascar, où la main-d'œuvre, moins chère, était malgré tout francophone (Marissal 2023). Malgré cette mobilisation, médiatisée par les délégués syndicaux, les licenciements ont été menés à leur terme et plus de cent employés ont perdu leur travail (Bez 2025). Est-ce à dire qu'il n'y a aucun moyen pour les salariés d'échapper à des calculs économiques en leur défaveur ? La mobilisation des salariés d'Onclusive a retardé l'échéance et moins d'emplois que prévus ont été supprimés (Bez 2025), signe que l'action, si elle n'a pas permis d'enrayer les licenciements, a tout de même porté quelques fruits. Ceux-ci sont probablement amers. Dans le même temps, pourtant, d'autres entreprises comme Klarna font machine arrière après des politiques de mise au chômage agressives, et visiblement trop optimistes économiquement (Ruault 2025). Si la nouvelle apparaît rassurante, elle rappelle que les entreprises gardent la maîtrise de leur effectif. C'est en ce sens que l'on peut comprendre le soutien apporté par J. S. Carbonell (2025) à un « renouveau luddite » qui viendrait remettre en question les logiques de déploiement de l'IA par des formes de résistance à imaginer et construire.

[365] A notre connaissance, ces positions n'apparaissent pas, pour l'instant, dans la littérature scientifique. Cependant, elles ont été formulées à plusieurs reprises par des membres de syndicats dans des événements auxquels nous avons participés.

[366] Comme pourrait le faire un mouvement aux tendances autoritaires comme Anti Tech Resistance, largement inspiré des thèses de Theodore Kaczynski et isolé par rapport à d'autres organisations écologistes plus intersectionnelles (Kloetzli 2025).

Le droit comme renfort ?

Dans une enquête menée dans l'industrie suédoise, où les syndicats sont relativement puissants, G. Bender (2024) décrypte les négociations à l'œuvre entre syndicats et entreprises. Dans l'une d'elles, au cœur de l'industrie minière (cas n°3 de l'étude), le déploiement de véhicules semi-auto-guidés déroge à la législation et aux accords de secteur en vigueur. Afin de mener à bien son projet, la firme n'a alors d'autre choix que se tourner vers les syndicats, placés en position de force pour négocier. Un tel cas illustre comment le droit peut lui aussi soutenir des formes d'organisation du travail favorables aux salariés.

La voie légale a déjà pu susciter des espoirs pour ce qui concerne l'horizontalité de la prise de décisions en entreprise. Dès 1982 par exemple, la promulgation des lois Auroux, encourageant l'expression et la participation des salariés aux décisions de l'entreprise, ont généré un certain enthousiasme[367] (Borzeix, Charles, et Zimmermann 2015). En complément d'une pratique éthique dont les réponses sont peu opérantes, et des négociations aux issues incertaines, la voie légale pourrait-elle être un véritable appui pour les travailleurs confrontés à l'IA ? A l'échelle des grandes organisations, la tenue de débat sur le changement technologique semble n'être possible qu'en contraignant les directions des entreprises.

Le droit du travail vise justement à contrebalancer l'inégalité induite par les relations de subordination au travail et pourrait, à ce titre, être mis au service de l'autonomie et de l'agentivité des salariés (Ponce Del Castillo et Taes 2025). Il faut l'admettre, la réponse a jusqu'ici été insuffisante. A la fin des années 2010, la voie choisie par l'Union Européenne pour l'introduction de l'IA dans les organisations a d'abord été celle de l'éthique, de façon non contraignante (Chagny 2025). L'éthique ne visait pas ici à alimenter le droit, mais plutôt à s'y substituer sous la forme de recommandations, sur le mode de l'incitation (Chagny 2025). Une nouvelle dynamique réglementaire a par la suite été impulsée, jusqu'à aboutir à la publication du Règlement Européen sur l'IA (*AI Act*) (Union Européenne 2024). Ce texte, en se concentrant sur une approche minimaliste par les risques fondamentaux, a complètement mis de côté la question de l'organisation du travail. Il vise prioritairement, comme le suggère O. Chagny (2025), à promouvoir la diffusion ces technologies, plutôt qu'à traiter de ses effets sur le travail. O. Chagny et N. Blanc (2024) déplorent ainsi les mesures de droit mou (*soft* law) qu'il a introduites. Elles laissent le loisir aux entreprises d'évaluer elles-mêmes le degré de risque induit par les dispositifs qu'elles déploient. L'occasion a été manquée, et les tentatives de freinage se poursuivent. Alors que le Règlement sur l'IA entre progressivement en vigueur, de grandes entreprises – multinationales françaises, acteurs de l'IA ou du semiconducteur – appellent déjà à la mise en pause de ces processus (Piquard 2025).

De telles déconvenues ne doivent pas décourager les partisans d'une régulation en faveur d'un contrôle plus grand des salariés sur leurs modes de travail. Récemment, plusieurs tribunaux judiciaires ont donné raison à des CSE d'entreprises dont les directions refusaient la consultation (Chanu 2025). Certes, ces consultations ne sont pas contraignantes (Ministère du Travail 2022), elles rendent cependant possible la tenue de débats internes. Visibilisés et exportés en dehors du cadre des entreprises concernées, ces enjeux peuvent créer des précédents et alimenter la connaissance du public vis-à-vis de ces thématiques.

[367] Malgré tout, cette ardeur a été douchée par le constat, dans les années qui ont suivi, de difficultés à pérenniser les groupes d'expression directe de salariés (Borzeix, Charles, et Zimmermann 2015). La participation peut aussi être mobilisée pour neutraliser la critique de l'organisation du travail (Rot 2002:719).

De telles mobilisations peuvent payer. Au Parlement européen (2024), l'attention s'est portée vers les travailleurs de plateforme au travers de l'adoption de la *Platform Work Directive*. Amenée à être mise en œuvre à l'échelle nationale dans les pays de l'Union européenne, la directive vise à définir le statut de travailleur de plateforme – y compris pour des travailleurs indépendants –, à établir leurs droits vis-à-vis de la gestion algorithmique de leur activité et à améliorer le contrôle des institutions sur ces formes d'emploi (Durri, Stylogiannis, et Wouters 2025). Il y a encore fort à faire pour aller plus loin, reconnaissent I. Durri et ses collègues (2025), mais cette directive constitue une étape importante dans l'encadrement de l'activité des plateformes. Alors que l'organisation du travail ne constitue toujours pas un angle de régulation central pour le législateur, un tel état de fait exhorte justement à redoubler d'efforts pour mettre ces thèmes à l'agenda.

C'est à notre sens le rôle d'une éthique du déploiement technologique que de rappeler – s'il fallait le faire – la légitimité des travailleurs à faire valoir leurs intérêts dans le changement technologique. La démarche vise à rendre compte des logiques socio-économiques que l'introduction massive de ces dispositifs soutient et, en contrepoids, à soutenir les voix marginalisées des utilisateurs, travailleurs, individus, sur qui repose la charge de leurs effets négatifs. Au-delà des intérêts des salariés, c'est plus largement ceux de la communauté qui sont à interroger. En France, mais aussi au Congo, au Ghana, à Madagascar, au Vénézuéla, en Chine et ailleurs, de nombreuses populations pâtissent concrètement de la chaîne de production du numérique. Alors que géants de la tech d'un côté, pouvoirs publics de l'autre, cherchent à imposer la diffusion des systèmes d'IA dans la vie personnelle et professionnelle, nous estimons que c'est collectivement que la mesure de l'IA mérite d'être prise.

Bibliographie

Abdalla, Mohamed, et Moustafa Abdalla. 2021. « The Grey Hoodie Project: Big Tobacco, Big Tech, and the Threat on Academic Integrity ». P. 287-97 in *Proceedings of the 2021 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society*.

Abou-Foul, Mohamad, Jose L. Ruiz-Alba, et Pablo J. López-Tenorio. 2023. « The Impact of Artificial Intelligence Capabilities on Servitization: The Moderating Role of Absorptive Capacity-A Dynamic Capabilities Perspective ». *Journal of Business Research* 157:113609. doi:10.1016/j.jbusres.2022.113609.

Achouch, Mounia, Mariya Dimitrova, Khaled Ziane, Sasan Sattarpanah Karganroudi, Rizck Dhouib, Hussein Ibrahim, et Mehdi Adda. 2022. « On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges ». *Applied Sciences* 12(16):8081. doi:10.3390/app12168081.

ADEME. 2022. *Evaluation de l'impact environnemental du numérique en France et analyse prospective. Evaluation environnementale des équipements et infrastructures numériques en France*. 2.

Aggeri, Franck. 2020. « Vers une innovation responsable ». *Esprit* Mars(3):40-51. doi:10.3917/espri.2002.0040.

Aggeri, Franck. 2023. *L'innovation, mais pour quoi faire ? Essai sur un mythe économique, social et managérial*. Paris: Éditions du Seuil.

Ahmed, Abdullah Ahsan, René H. Reich, Andrea Di Maria, Lizzie Boakes, Cédric Rolin, et Karel Van Acker. 2025. « Regionalized Life Cycle Assessment of Silicon Wafers Supply Chains in the Semiconductor Industry ». *Circular Economy and Sustainability* 5(3):2347-71. doi:10.1007/s43615-024-00480-5.

Ahmed, Shazeda, Klaudia Jaźwińska, Archana Ahlawat, Amy Winecoff, et Mona Wang. 2024. « Field-Building and the Epistemic Culture of AI Safety ». *First Monday* 29(4).

Akrich, Madeleine. 1987. « Comment décrire les objets techniques ? » *Techniques et Culture* (9):49-64.

Akrich, Madeleine. 1989. « La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques ». *Anthropologie et Sociétés* 13(2):31-54. doi:10.7202/015076ar.

Akrich, Madeleine. 1991. « L'analyse socio-technique ». P. 339-53 in *La gestion de la recherche*, édité par D. Vinck. De Boeck.

Alexandre, Laurent. 2019. *La guerre des intelligences: comment l'intelligence artificielle va révolutionner l'éducation*. Le livre de poche. Paris: Librairie Générale Française.

Allouch, Annabelle. 2017. *La société du concours. L'empire des classements scolaires*. La République des idées. Paris: Seuil : La République des idées.

Alter, Norbert. 2013. *L'innovation ordinaire*. 6e éd. Quadrige. Paris: PUF.

Altman, Sam. 2023. « Planning for AGI and Beyond ». https://openai.com/blog/planning-for-agi-and-beyond.

Alvarado, Ramón. 2023. « AI as an Epistemic Technology ». *Science and Engineering Ethics* 29(5):1-30. doi:10.1007/s11948-023-00451-3.

Alves Da Costa, Théo, et Lou Welgryn. 2025. « Intelligence artificielle : le vrai coût environnemental de la course à l'IA ». https://bonpote.com/intelligence-artificielle-le-vrai-cout-environnemental-de-la-course-a-lia/.

Ananny, Mike. 2022. « Seeing like an Algorithmic Error: What Are Algorithmic Mistakes, Why Do They Matter, How Might They Be Public Problem? » *Yale Journal of Law and Technology* 24:1-21. https://law.yale.edu/sites/default/files/area/center/isp/documents/ananny.pdf.

Anders, Günther. [1956] 2002. *L'Obsolescence de l'Homme*. Éd. de l'Encyclopédie des nuisances.

Anderson, Chris. 2008. « The End of Theory: The Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete ». *Wired*, 3.

Anderson, Marc M. 2024. « AI as Philosophical Ideology: A Critical Look Back at John McCarthy's Program ». *Philosophy & Technology* 37(2):44. doi:10.1007/s13347-024-00731-1.

Andreessen, Marc. 2023. « The Techno-Optimist Manifesto ». https://a16z.com/the-techno-optimist-manifesto/.
Angwin, Julia, Jeff Larson, Surya Mattu, et Lauren Kirchner. 2016. « Machine Bias ».
Anichini, Giulia, et Bénédicte Geffroy. 2021. « L'intelligence artificielle à l'épreuve des savoirs tacites. Analyse des pratiques d'utilisation d'un outil d'aide à la détection en radiologie ». *Sciences Sociales et Santé* 39(2):43-69.
Anscombe, Elisabeth. [1958] 2008. « La philosophie morale moderne ». *Klésis* 9:9-31.
Ansell, Christopher, et Martin Bartenberger. 2018. « The diversity of experimentation in the experimenting society ». P. 36-58 in *New Perspectives on Technology in Society: Experimentation beyond the Laboratory*, édité par I. van de Poel, L. Asveld, et D. C. Mehos. London ; New York, NY: Routledge, Taylor & Francis Group.
Ao, Bochao, et Bingbing Fan. 2022. « Overview of the development of AI dataset annotation ». P. 174-81 in *2022 2nd International Symposium on Artificial Intelligence and its Application on Media (ISAIAM)*.
Aradau, Claudia, et Tobias Blanke. 2021. « Algorithmic Surveillance and the Political Life of Error ». *Journal for the History of Knowledge* 2(1):10. doi:10.5334/jhk.42.
Arena, Lise, Gérald Gaglio, et Jean-Sébastien Vayre. 2022. « Comment les radiologues ont-ils fait face à l'annonce programmée de leur remplacement par l'IA ? » in *Matérialités et représentations dans l'intelligence artificielle : l'IA au prisme des SHS*. Paris, EHESS: GREDEG Working Paper, n°2022-40.
Arena, Lise, Gérald Gaglio, et Jean-Sébastien Vayre. 2024. « Imbrication et « professionnalisation » des promesses sociotechniques:Le cas de l'IA en radiologie ». *Réseaux* 248(6):33-72. doi:10.3917/res.248.0033.
Arntz, Melanie, Terry Gregory, et Ulrich Zierahn. 2016. *The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis*. Vol. 189. *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*. 189. OECD Social, Employment and Migration Working Papers. OCDE. doi:10.1787/5jlz9h56dvq7-en.
Asghar, Sohail, Gulmina Rextina, Tanveer Ahmed, et Manzoor Illahi Tamimy. 2020. *The Fourth Industrial Revolution in the Developing Nations: Challenges and Road Map*. Research Paper n°102. Genève: South Centre.
Atifi, Hassan, Nadia Gauducheau, et Michel Maroccia. 2017. « « Je devine que tu dois être surbookée » : anticiper la multi-activité de ses interlocuteurs dans les courriels professionnels ». P. 169-83 in *Quand travailler, c'est s'organiser. La multi-activité à l'ère numérique*, *Collection Sciences sociales*. Paris: Presses des Mines-Transvalor.
Aubry, Mathilde. 2012. « Le marché des semiconducteurs : cyclicité et innovation : un essai de modélisation ». These de doctorat, Caen.
Audétat, Marc, Gaïa Barazzetti, Gabriel Dorthe, Claude Joseph, Alain Kaufmann, et Dominique Vinck, éd. 2015. *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses ?* Paris: Hermann.
Austin, John L. 1975. *How to Do Things with Words*. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
Autor, David H. 2015. « Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation ». *Journal of Economic Perspectives* 29(3):3-30. doi:10.1257/jep.29.3.3.
Autor, David H., et David Dorn. 2013. « The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market ». *American Economic Review* 103(5):1553-97. doi:10.1257/aer.103.5.1553.
Avnoon, Netta. 2021. « Data Scientists' Identity Work: Omnivorous Symbolic Boundaries in Skills Acquisition ». *Work, Employment and Society* 35(2):332-49. doi:10.1177/0950017020977306.
Bachelard, Gaston. 1938. *La Formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
Bailey, Diane E., et Stephen R. Barley. 2011. « Teaching-Learning Ecologies: Mapping the Environment to Structure Through Action ». *Organization Science* 22(1):262-85. doi:10.1287/orsc.1090.0511.

Bailey, Diane E., et Stephen R. Barley. 2020. « Beyond Design and Use: How Scholars Should Study Intelligent Technologies ». *Information and Organization* 30(2):100286. doi:10.1016/j.infoandorg.2019.100286.
Bailey, Diane E., Paul M. Leonardi, et Stephen R. Barley. 2012. « The Lure of the Virtual ». *Organization Science* 23(5):1485-1504. doi:10.1287/orsc.1110.0703.
Bailey, Simon, Dean Pierides, Adam Brisley, Clara Weisshaar, et Tom Blakeman. 2020. « Dismembering Organisation: The Coordination of Algorithmic Work in Healthcare ». *Current Sociology* 68(4):546-71. doi:10.1177/0011392120907638.
Bainbridge, Lisanne. 1983. « Ironies of automation ». *Automatica* 19(6):775-79. doi:10.1016/0005-1098(83)90046-8.
Barcellini, Flore, Richard Béarée, Tahar-Hakim Benchekroun, Mouad Bounouar, Willy Buchmann, Gérard Dubey, Anne-Cécile Lafeuillade, Caroline Moricot, Céline Rosselin-Bareille, Marco Saraceno, et Ali Siadat. 2023. « Promises of Industry 4.0 under the Magnifying Glass of Interdisciplinarity: Revealing Operators and Managers Work and Challenging Collaborative Robot Design ». *Cognition, Technology & Work* 25(2):251-71. doi:10.1007/s10111-023-00726-6.
Barcellini, Flore, Tamari Gamkrelidze, Nathalie Greenan, Annie Jolivet, et Moustafa Zouinar. 2024. *Le travail et l'emploi à l'épreuve de l'IA : Etat des lieux et analyse critique de la littérature*. Institut de Recherches Économiques et Sociales.
Bareis, Jascha, et Christian Katzenbach. 2022. « Talking AI into Being: The Narratives and Imaginaries of National AI Strategies and Their Performative Politics ». *Science, Technology, & Human Values* 47(5):855-81. doi:10.1177/01622439211030007.
Barley, Stephen R. 1986. « Technology as an Occasion for Structuring: Evidence from Observations of CT Scanners and the Social Order of Radiology Departments ». *Administrative Science Quarterly* 31(1):78-108.
Barret-Bertelloni, Maud, Pauline Gourlet, et Félix Tréguer. 2025. « Quand les syndicats affrontaient le numérique ». *Le Monde diplomatique*, Septembre 2025, 3.
Batra, Gaurav, Zach Jacobson, Siddarth Madhav, Andrea Queirolo, et Nick Santhanam. 2018. *Artificial-Intelligence Hardware: New Opportunities for Semiconductor Companies*. McKinsey & Company.
Baudrillard, Jean. 1981. *Simulacres et simulation*. Débats. Paris: Galilée.
Beane, Matthew. 2019. « Shadow Learning: Building Robotic Surgical Skill When Approved Means Fail ». *Administrative Science Quarterly* 64(1):87-123. doi:10.1177/0001839217751692.
Beaud, Stéphane, et Florence Weber. 2003. *Guide de l'enquête de terrain: produire et analyser des données ethnographiques*. Grands repères. Paris: la Découverte.
Beaudouin, Valérie, et Winston Maxwell. 2023. « La prédiction du risque en justice pénale aux états-unis : l'affaire propublica-compas. L'éthique de l'IA en action ». *Réseaux* 240(4):71-109. doi:10.3917/res.240.0071.
Bechmann, Anja, et Geoffrey C. Bowker. 2019. « Unsupervised by Any Other Name: Hidden Layers of Knowledge Production in Artificial Intelligence on Social Media ». *Big Data & Society* 6(1):1-11. doi:10.1177/2053951718819569.
Becker, Howard Saul, et Pamela Richards. [1986] 2007. *Writing for Social Scientists: How to Start and Finish Your Thesis, Book, or Article*. 2nd ed. Chicago Guides to Writing, Editing, and Publishing. Chicago: University of Chicago Press.
Beer, David. 2016. « How Should We Do the History of Big Data? » *Big Data & Society* 3(1):2053951716646135. doi:10.1177/2053951716646135.
Behrend, Clara, et Mathias Cuypers. 2023. *Structural change of occupations, tasks, and skills*. Projet Beyond 4.0. https://www.beyond4-0.eu/storage/publications/D5.1%20Analysing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation/D5.1%20Analy

sing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation.pdf.
Behrend, Clara, Adrian Götting, Michael Kohlgrüber, Egoitz Pomares, et Sally Wright. 2022. *Understanding future skills and enriching the skills debate - third report*. Projet Beyond 4.0. https://www.beyond4-0.eu/storage/publications/D6.1%20Understanding%20future%20skills%20and%20enriching%20the%20skills%20debate/BEY4.0_WP06_Task_6.1-%203rd%20Update%2008.2022.pdf.
Bellon, Anne, et Julia Velkovska. 2023. « L'intelligence artificielle dans l'espace public : du domaine scientifique au problème public. Enquête sur un processus de publicisation controversé ». *Réseaux* 240(4):31-70. doi:10.3917/res.240.0031.
Benbouzid, Bilel, Yannick Meneceur, et Nathalie Alisa Smuha. 2022. « Quatre nuances de régulation de l'intelligence artificielle: Une cartographie des conflits de définition ». *Réseaux* 232-233(2):29-64. doi:10.3917/res.232.0029.
Bender, Emily M., Timnit Gebru, Angelina McMillan-Major, et Margaret Mitchell. 2021. « On the Dangers of Stochastic Parrots: Can Language Models Be Too Big? 🦜 ». P. 610-23 in *Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency*. Virtual Event Canada: ACM.
Bender, German. 2024. « Union Influence over Algorithmic Systems: Evidence from Sweden ». P. 229-36 in *Artificial intelligence, labour and society*, édité par A. Ponce Del Castillo. Bruxelles: ETUI aisb.
Benedetto-Meyer, Marie, et Anca Boboc. 2019. « Accompagner la « transformation digitale » : du flou des discours à la réalité des mises en œuvre ». *Travail et Emploi* (159):93-118. doi:10.4000/travailemploi.9391.
Benedetto-Meyer, Marie, et Anca Boboc. 2021. *Sociologie du numérique au travail*. Malakoff: Armand Colin.
Berkouk, Nicolas, Mehdi Arfaoui, Romain Pialat, Pierre Francois, et Laurence Barry. 2025. « Embrace the Opaque: A Sociology of the xAI Community ».
Bernard, Julien. 2008. « Bonne distance et empathie dans le travail émotionnel des pompes funèbres: L'analyse des interactions en milieu professionnel ». *Journal des anthropologues* (114-115):109-28. doi:10.4000/jda.317.
Bernaud, Jean-Luc, Pascale Desrumaux, et Dominique Guédon. 2021. « Empathie organisationnelle et soutins organisationnels perçus ». in *Psychologie de la bientraitance professionnelle. Concepts, modèles et dispositifs*, *Univers psy*. Malakoff: Dunod.
Bernoux, Philippe, et Yves-C. Gagnon. 2008. « Une nouvelle voie pour réussir les changements technologiques : la co-construction ». *La Revue des Sciences de Gestion* 233(5):51-58. doi:10.3917/rsg.233.0051.
Bertolucci, Marius. 2023. *L'homme diminué par l'IA*. Paris: Hermann.
Bertolucci, Marius. 2024. « L'intelligence artificielle dans le secteur public : revue de la littérature et programme de recherche ». *Gestion et management public* Pub. anticipées(5):118-39. doi:10.3917/gmp.pr1.0008.
Bertrand, Romain. 2023. « Le numérique porte conseil ? Les consultants en Intelligence Artificielle dans la fabrique du capitalisme numérique ». phdthesis, Université Paris sciences et lettres.
Bessant, John, et David Francis. 1999. « Developing Strategic Continuous Improvement Capability ». *International Journal of Operations & Production Management* 19(11):1106-19. doi:10.1108/01443579910291032.
Bez, Adrien. 2025. « Dans les entreprises, la grande peur de voir l'intelligence artificielle devenir un motif banal de licenciement ». *Le Figaro (site web)*.
Bhuyan, Bikram Pratim, Amar Ramdane-Cherif, Ravi Tomar, et T. P. Singh. 2024. « Neuro-Symbolic Artificial Intelligence: A Survey ». *Neural Computing and Applications* 36(21):12809-44. doi:10.1007/s00521-024-09960-z.

Bidet, Alexandra. 2008. « L'homme et l'automate. L'écologie élargie du travail contemporain ». *Sociologie du travail* 50(3):372-95. doi:10.4000/sdt.19513.
Bidet, Alexandra. 2017. « Être « contraint de s'organiser » : la multi-activité, entre situations de travail et forme sociale ». P. 23-41 in *Quand travailler, c'est s'organiser. La multi-activité à l'ère numérique*, *Collection Sciences sociales*. Paris: Presses des Mines-Transvalor.
Bidet, Alexandra, Caroline Datchary, et Gérald Gaglio. 2017. *Quand travailler, c'est s'organiser. La multi-activité à l'ère numérique*. Collection Sciences sociales. Paris: Presses des Mines-Transvalor.
Bihouix, Philippe. 2021. « Matérialité du productivisme ». P. 83-101 in *Politiques de l'anthropocène*, *Références*. Paris: Sciences po, les presses.
Binns, Reuben. 2018. « Fairness in Machine Learning: Lessons from Political Philosophy ». P. 149-59 in *Proceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency*. Vol. 81.
Blanc-Brude, Véronique. 2023. « Analyse clinique du métier de technicien opérateur de production en microéléctronique à l'épreuve de l'automatisation 4.0. Lecture par la Clinique de l'activité et enjeux de GRH ». Sciences de gestion, Université Grenoble-Alpes.
Blanc-Brude, Véronique, et Christian Defélix. 2023. « Des puces et des hommes : quand le travail « 4.0 » se révèle plus humain que prévu ». *Annales des Mines - Gérer et comprendre* 153(3):49-59. doi:10.3917/geco1.153.0049.
Blanchet, Max. 2016. « Industrie 4.0 Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique ». *Outre-Terre* 46(1):62-85. doi:10.3917/oute1.046.0062.
Bloor, David. 1980. *Knowledge and Social Imagery*. Repr. Routledge Direct Editions. London: Routledge & Kegan Paul.
Bobillier-Chaumon, Marc-Éric, et Michel Dubois. 2009. « L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? » *Le travail humain* 72(4):355-82. doi:10.3917/th.724.0355.
Boboc, Anca. 2017. « Numérique et travail : quelles influences ? » *Sociologies pratiques* N° 34(1):3-12. doi:10.3917/sopr.034.0003.
Boboc, Anca. 2021. « La participation numérique au travail, actualité nouvelle d'un vieux débat ». *La revue des conditions de travail* 12:54-61.
Boltanski, Christophe. 2011. *Minerais de sang. Les esclaves du monde moderne*. Paris: Grasset.
Bômont, Clotilde. 2023. « Géopolitique du cloud défense français : analyse des nouvelles formes d'organisation spatiale du pouvoir de l'Etat à travers la construction d'un objet socio-technique ». These de doctorat, Paris 1.
Borel, Simon, Jean Condé, et Yann Ferguson. 2024a. *Etude des impacts de l'IA sur le travail. Rapport d'enquête LaborIA Explorer*. LaborIA. https://www.laboria.ai/wp-content/uploads/2024/05/Synthese_generale_LaborIA_Explorer.pdf.
Borel, Simon, Jean Condé, et Yann Ferguson. 2024b. *Etude des impacts de l'IA sur le travail. Synthèse générale du rapport d'enquête du LaborIA Explorer*. LaborIA. https://www.laboria.ai/wp-content/uploads/2024/05/Synthese_generale_LaborIA_Explorer.pdf.
Borup, Mads, Nik Brown, Kornelia Konrad, et Harro Van Lente. 2006. « The Sociology of Expectations in Science and Technology ». *Technology Analysis & Strategic Management* 18(3-4):285-98. doi:10.1080/09537320600777002.
Bory, Paolo. 2019. « Deep New: The Shifting Narratives of Artificial Intelligence from Deep Blue to AlphaGo ». *Convergence: The International Journal of Research into New Media Technologies* 25(4):627-42. doi:10.1177/1354856519829679.
Borzeix, Anni, Julien Charles, et Bénédicte Zimmermann. 2015. « Réinventer le travail par la participation. Actualité nouvelle d'un vieux débat ». *Sociologie du travail* 57(1):1-19. doi:10.4000/sdt.1770.

Boser, Bernhard E., Isabelle M. Guyon, et Vladimir N. Vapnik. 1992. « A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers ». P. 144-52 in *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory - COLT '92*. Pittsburgh, Pennsylvania, United States: ACM Press.
Bostrom, Nick. [2014] 2017. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Reprinted with corrections 2017. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
Botchkarev, Alexei. 2019. « Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology ». *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management* (14):45-79. doi:10.28945/4184.
Boullier, Dominique. 2023. *Propagations: un nouveau paradigme pour les sciences sociales*. Collection U. Malakoff: Armand Colin.
Boullier, Dominique, et El Mahdi El Mhamdi. 2020. « Le machine learning et les sciences sociales à l'épreuve des échelles de complexité algorithmique ». *Revue d'anthropologie des connaissances* 14(1). doi:10.4000/rac.4260.
Bourdieu, Pierre, et Jean-Claude Passeron. [1970] 2005. *La Reproduction. Eléments pour une théorie du système d'enseignement*. Collection « Le sens commun ». Paris: Éd. de Minuit.
Bourguignon, Annick. 1997. « Sous les pavés la plage… ou les multiples fonctions du vocabulaire comptable : l'exemple de la performance ». *Comptabilité Contrôle Audit* 3(1):89-101. doi:10.3917/cca.031.0089.
Bourne, Clea. 2024. « AI Hype, Promotional Culture, and Affective Capitalism ». *AI and Ethics* 4(3):757-69. doi:10.1007/s43681-024-00483-w.
Bowker, Geoffrey C., et Susan Leigh Star. 2000. *Sorting Things Out. Classification and Its Consequences*. First MIT Press paperback edition. Inside Technology. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
boyd, danah, et Kate Crawford. 2012. « Critical Questions for Big Data: Provocations for a cultural, technological, and scholarly phenomenon ». *Information, Communication & Society* 15(5):662-79. doi:10.1080/1369118X.2012.678878.
Brafman, Nathalie. 2006. « Alcatel : l'ultime pari de M. Tchuruk ». avril 5.
Braverman, Harry. 1974. *Labor and Monopoly Capital: the Degradation of Work in the Twentieth Century*. New York: Monthly Review Press.
Breiman, Leo, et Adele Cutler. 2001. « Random Forests ». *Machine Learning* 45:5-32.
Brennen, J. Scott, Philip N. Howard, et Rasmus K. Nielsen. 2022. « What to Expect When You're Expecting Robots: Futures, Expectations, and Pseudo-Artificial General Intelligence in UK News ». *Journalism* 23(1):22-38. doi:10.1177/1464884920947535.
Brennen, J. Scott, Philip N. Howard, et Rasmus Kleis Nielsen. 2018. « An Industry-Led Debate: How UK Media Cover Artificial Intelligence ». *Reuters Institute for the Study of Journalism*.
Breton, Philippe. 1995. *A l'image de l'homme: du Golem aux créatures virtuelles*. Science ouverte. Paris: Seuil.
Brunet, Adam Paul, et Steve New. 2003. « Kaizen in Japan: an empirical study ». *International Journal of Operations & Production Management* 23(12):1426-46. doi:10.1108/01443570310506704.
Brunnbauer, Matthias. 2023. « How Top-Down AI Introduction Leads to Incremental Business Improvement ».
Brynjolfsson, Erik, et Andrew McAfee. 2014. *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. First Edition. New York London: W. W. Norton & Company.
Bueno, Adauto, Moacir Godinho Filho, et Alejandro G. Frank. 2020. « Smart Production Planning and Control in the Industry 4.0 Context: A Systematic Literature Review ». *Computers & Industrial Engineering* 149:106774. doi:10.1016/j.cie.2020.106774.
Bunz, Mercedes, et Marco Braghieri. 2022. « The AI Doctor Will See You Now: Assessing the Framing of AI in News Coverage ». *AI & SOCIETY* 37(1):9-22. doi:10.1007/s00146-021-01145-9.

Buolamwini, Joy, et Timnit Gebru. 2018. « Gender Shades: Intersectional Accuracy Disparities in Commercial Gender Classification ». P. 77-91 in *Proceedings of the 1st Conference on Fairness, Accountability and Transparency*.
Burrell, Jenna. 2016. « How the Machine 'Thinks': Understanding Opacity in Machine Learning Algorithms ». *Big Data & Society* 3(1):205395171562251. doi:10.1177/2053951715622512.
Butollo, Florian, Ulrich Jürgens, et Martin Krzywdzinski. 2019. « From Lean Production to Industrie 4.0: More Autonomy for Employees? » P. 61-80 in *Digitalization in Industry*, édité par U. Meyer, S. Schaupp, et D. Seibt. Cham: Springer International Publishing.
Callon, Michel. 1986. « Eléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc ». *L'Année sociologique* 36:169-208. https://www.jstor.org/stable/27889913.
Calude, Cristian S., et Giuseppe Longo. 2017. « The Deluge of Spurious Correlations in Big Data ». *Foundations of Science* 22(3):595-612. doi:10.1007/s10699-016-9489-4.
Campolo, Alexander, et Kate Crawford. 2020. « Enchanted Determinism: Power without Responsibility in Artificial Intelligence ». *Engaging Science, Technology, and Society* 6:1-19. doi:10.17351/ests2020.277.
Carbonell, Javier, Antonio Sánchez-Esguevillas, et Belén Carro. 2016. « The role of metaphors in the development of technologies. The case of the artificial intelligence ». *Futures* 84:145-53. doi:10.1016/j.futures.2016.03.019.
Carbonell, Juan Sebastián. 2020. « The Factory of the Future? The Contradictory Restructuring of an Assembly Line in France ». *Sociologia del lavoro* (158):118-36. doi:10.3280/SL2020-158006.
Carbonell, Juan Sebastián. 2022. *Le futur du travail*. Paris: Éditions Amsterdam.
Carbonell, Juan Sebastián. 2025. *Un taylorisme augmenté: critique de l'intelligence artificielle*. Paris: Amsterdam.
Cardon, Dominique, Jean-Philippe Cointet, et Antoine Mazières. 2018. « La revanche des neurones: L'invention des machines inductives et la controverse de l'intelligence artificielle ». *Réseaux* n° 211(5):173-220. doi:10.3917/res.211.0173.
Carrigan, Coleen, Madison W. Green, et Abibat Rahman-Davies. 2021. « "The Revolution Will Not Be Supervised": Consent and Open Secrets in Data Science ». *Big Data & Society* 8(2):205395172110356. doi:10.1177/20539517211035673.
Carroll, Jennie. 2004. « Completing Design in Use: Closing the Appropriation Cycle ». in *ECIS 2004 Proceedings*.
de Carvalho, Aparecido Fabiano Pinatti, Sven Hoffmann, Darwin Abele, Marcus Schweitzer, Peter Tolmie, David Randall, et Volker Wulf. 2018. « Of Embodied Action and Sensors: Knowledge and Expertise Sharing in Industrial Set-Up ». *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 27(3-6):875-916. doi:10.1007/s10606-018-9320-6.
Casilli, Antonio A. 2019. *En attendant les robots: enquête sur le travail du clic*. La couleur des idées. Paris: Éditions du Seuil.
Casilli, Antonio A. 2024. « "End-to-end" ethical AI. Taking into account the social and natural environments of automation ». P. 83-92 in *Artificial intelligence, labour and society*, édité par A. Ponce del Castillo. ETUI.
Cassiani-Laurin, Frédéric. 2018. « La singularité transhumaniste comme mythe eschatologique contemporain : l'utopie technologique en tant qu'achèvement du projet moderne ». Mémoire de science des religions, Université du Québec, Montréal.
Catanzariti, Benedetta. 2025. « Taming Affect: On the Construction of Objectivity in Data Annotation Practices ». *Digital Society* 4(2):40. doi:10.1007/s44206-025-00198-3.
Cave, Stephen, et Kanta Dihal. 2019. « Hopes and Fears for Intelligent Machines in Fiction and Reality ». *Nature Machine Intelligence* 1(2):74-78. doi:10.1038/s42256-019-0020-9.
Cave, Stephen, et Kanta Dihal. 2020. « The Whiteness of AI ». *Philosophy & Technology* 33(4):685-703. doi:10.1007/s13347-020-00415-6.

Chagny, Odile. 2025. « Règlement européen sur l'intelligence artificielle : quelle place pour le dialogue social et les syndicats ? » *Chronique Internationale de l'IRES* 190.
Chagny, Odile, et Nicolas Blanc. 2024. « Social Dialogue as a Form of Bottom-up Governance for AI: The Experience in France ». P. 197-205 in *Artificial intelligence, labour and society*, édité par A. Ponce Del Castillo. European Trade Union Institute (ETUI).
Challapally, Aditya, Chris Pease, Ramesh Raskar, et Pradyumna Chari. 2025. *The GenAI Divide. State of AI in Business 2025*. MIT NANDA.
Chamboredon, Hélène, Fabienne Pavis, Muriel Surdez, et Laurent Willemez. 1994. « S'imposer aux imposants. A propos de quelques obstacles rencontrés par des sociologues débutants dans la pratique et l'usage de l'entretien ». *Genèses* 16(1):114-32. doi:10.3406/genes.1994.1251.
Chandhiramowuli, Srravya, Alex S. Taylor, Sara Heitlinger, et Ding Wang. 2024. « Making Data Work Count ». *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction* 8(CSCW1):1-26. doi:10.1145/3637367.
Chanu, Aline. 2025. « Droits des travailleurs et intelligence artificielle : le CSE doit être consulté - La chronique juridique ». https://www.humanite.fr/social-et-economie/chronique-juridique/droits-des-travailleurs-et-intelligence-artificielle-le-cse-doit-etre-consulte.
Chen, Alexander. 2023. « How It's Made: Interacting with Gemini through Multimodal Prompting ». https://developers.googleblog.com/en/how-its-made-interacting-with-gemini-through-multimodal-prompting/.
Chen, Yihua, Ivanka Visnjic, Vinit Parida, et Zhengang Zhang. 2021. « On the Road to Digital Servitization – The (Dis)Continuous Interplay between Business Model and Digital Technology ». *International Journal of Operations & Production Management* 41(5):694-722. doi:10.1108/IJOPM-08-2020-0544.
Cholez, Céline. 2008. « Compétences spatiales, compétences d'action dans l'espace:La tournée du chauffeur-livreur ». *Revue d'anthropologie des connaissances* 21(1):37-62. doi:10.3917/rac.003.0037.
Clair, Alice, et Julien Guillot. 2023. « En graphiques - Guerre des puces : tout comprendre aux semi-conducteurs ». https://www.liberation.fr/international/en-graphiques-guerre-des-puces-tout-comprendre-aux-semi-conducteurs-20230830_BTOOGCLB7BFV7G5KVW73H33VWA/.
Claverie, Bernard, Benoît Le Le Blanc, et Pascal Fouillat. 2013. « La cobotique. La robotique soumise ». *Communication et organisation. Revue scientifique francophone en Communication organisationnelle* (44):203-14. doi:10.4000/communicationorganisation.4425.
CNPEN et CCNE. 2022. *Diagnostic Médical et Intelligence Artificielle : Enjeux Éthiques. Avis commun du CCNE et du CNPEN*. Avis 141 du CCNE, Avis 4 du CNPEN. https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2023-01/Avis%20141%20du%20CCNE%20et%204%20du%20CNPEN%20Diagnostic%20M%C3%A9dical%20et%20Intelligence%20Artificielle%20%20Enjeux%20Ethiques.pdf.
Colleret, Maxime, et Mahdi Khelfaoui. 2021. « D'une révolution avortée à une autre? Les politiques québécoises en nanotechnologies et en IA au prisme de l'économie de la promesse ». *Recherches sociographiques* 61(1):163-88. doi:10.7202/1075904ar.
Collerette, Pierre, Martin Lauzier, et Robert Schneider. 2021. *Le pilotage du changement*. 3e éd. Québec: Presses de l'Université du Québec.
Commission d'enrichissement de la langue française. 2025. « 50 termes clés de l'intelligence artificielle ».
Commission Européenne. 2024. *Évaluation ex post d'Horizon 2020, le programme-cadre de l'UE pour la recherche et l'innovation.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52024SC0030.
Comte, Auguste. 1989. *Cours de philosophie positive*. Les Intégrales de philo. Paris: Nathan.
Condé, Jean, et Yann Ferguson. 2023. *Usages et impacts de l'IA sur le travail, au prisme des décideurs*. LaborIA.

Conesa, Elsa. 2024. « Elon Musk apporte son soutien à l'extrême droite allemande ». *Le Monde*, décembre 20.
Cook, Scott D. N., et John Seely Brown. 1999. « Bridging Epistemologies: The Generative Dance between Organizational Knowledge and Organizational Knowing ». *Organization Science* 10(4):381-400.
Corbett-Davies, Sam, Emma Pierson, Avi Feller, et Sharad Goel. 2016. « A Computer Program Used for Bail and Sentencing Decisions Was Labeled Biased against Blacks. It's Actually Not That Clear. » *The Washington Post*, octobre 17.
Couillet, Romain, Pierre-Olivier Amblard, Denis Trystram, et Achille Baucher. 2022. « L'intelligence artificielle peut-elle devenir un outil convivial ? ou doit-on immédiatement arrêter toute recherche en IA ? » in *Conférence Archipel 2022 : Risques systémiques, trajectoires et leviers d'action transdisciplinaires*. Grenoble, France.
Coutant, Alexandre. 2015. « Les approches sociotechniques dans la sociologie des usages en SIC ». *Revue française des sciences de l'information et de la communication* (6). doi:10.4000/rfsic.1271.
Coutant, Hadrien. 2025. « Devenir ingénieur·e écologiste : l'engagement écologiste par et dans le travail d'ingénieur·e ». *Sociologie du travail* 67(1). doi:10.4000/145x3.
Craipeau, Sylvie. 2001. *L'entreprise commutante. Travailler ensemble séparément*. Paris: Hermès science publications Lavoisier.
Crawford, Alan. 2010. « Merkel Appoints Henning Kagermann to Head Panel on Innovation ». *Bloomberg.Com*, septembre 11.
Crawford, Kate. 2023. *Contre-atlas de l'intelligence artificielle: les coûts politiques, sociaux et environnementaux de l'IA*. Z a. Paris Veules-les-roses: Éditions Zulma.
Crawford, Kate, et Trevor Paglen. 2019. « Excavating AI: The Politics of Training Sets for Machine Learning ». https://excavating.ai.
Crawford, Matthew B. 2010. *Éloge du carburateur: essai sur le sens et la valeur du travail*. Cahiers libres. Paris: la Découverte.
Crépel, Maxime, et Dominique Cardon. 2022. « Robots vs algorithmes. Prophétie et critique dans la représentation médiatique des controverses de l'IA ». *Réseaux* 232233(2):129-67. doi:10.3917/res.232.0129.
Creutzig, Felix, Daron Acemoglu, Xuemei Bai, Paul N. Edwards, Marie Josefine Hintz, Lynn H. Kaack, Siir Kilkis, Stefanie Kunkel, Amy Luers, Nikola Milojevic-Dupont, Dave Rejeski, Jürgen Renn, David Rolnick, Christoph Rosol, Daniela Russ, Thomas Turnbull, Elena Verdolini, Felix Wagner, Charlie Wilson, Aicha Zekar, et Marius Zumwald. 2022. « Digitalization and the Anthropocene ». *Annual Review of Environment and Resources* 47(1):479-509. doi:10.1146/annurev-environ-120920-100056.
Crockett, MJ. 2025. « AI Is 'Beating' Humans at Empathy and Creativity. But These Games Are Rigged ». *The Guardian*, février 27.
Crosby, Philip B. 1979. *Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain*. New York: McGraw-Hill.
Crozier, Michel, et Erhard Friedberg. [1977] 2014. *L'acteur et le système : les contraintes de l'action collective*. Réimpr. Collection Points Série Essais. Paris: Éd. du Seuil.
Cuillerier, Maxime, Justin Lawarée, et Christian Boudreau. 2023. « L'inertie organisationnelle et l'adoption de l'intelligence artificielle dans les organisations publiques: une analyse thématique de la littérature ». *Télescope SM&P-OE* 20(3). https://espace.enap.ca/id/eprint/481/1/Telescope_Cuillerier_Lawaree_Boudreau_20240209.pdf.
Curci, Ylenia, Nathalie Greenan, et Silvia Napolitano. 2023. *Structural transformation of employment and labour market*. Projet Beyond 4.0. https://www.beyond4-0.eu/storage/publications/D5.1%20Analysing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation/D5.1%20Analy

sing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation.pdf.
Cusumano, Michael A., Steven J. Kahl, et Fernando F. Suarez. 2015. « Services, Industry Evolution, and the Competitive Strategies of Product Firms ». *Strategic Management Journal* 36(4):559-75. doi:10.1002/smj.2235.
Dafoe, Allan. 2015. « On Technological Determinism: A Typology, Scope Conditions, and a Mechanism ». *Science, Technology, & Human Values* 40(6):1047-76. doi:10.1177/0162243915579283.
Danaher, John. 2017. « Will Life Be Worth Living in a World Without Work? Technological Unemployment and the Meaning of Life ». *Science and Engineering Ethics* 23(1):41-64. doi:10.1007/s11948-016-9770-5.
Dandurand, Guillaume, Florence Lussier-Lejeune, Daniel Letendre, et Marie-Jean Meurs. 2022. *Attentes et promesses technoscientifiques*. Les Presses de l'Université de Montréal.
Darmon, Muriel. 2015. *Classes préparatoires. La fabrique d'une jeunesse dominante*. La Découverte-poche. Paris: la Découverte.
Darr, Asaf, et Trevor Pinch. 2013. « Performing Sales: Material Scripts and the Social Organization of Obligation ». *Organization Studies* 34(11):1601-21. doi:10.1177/0170840612470228.
Darrach, Brad. 1970. « Meet Shaky, the first electronic person. The fascinating and fearsome reality of a machine with a mind of its own ». *Life*, 588-96.
Darwin, Charles. [1859] 2009. *L'origine des espèces*. édité par J. Picon. Les livres qui ont changé le monde. Paris: « le Monde » Flammarion.
Daston, Lorraine, et Peter Galison. 1992. « The Image of Objectivity ». *University of California Press* 40:81-128.
Datchary, Caroline. 2011. *La dispersion au travail*. Collection Travail & activité humaine. Toulouse: Octares éd.
Datchary, Caroline, et Christian Licoppe. 2007. « La multi-activité et ses appuis : l'exemple de la « présence obstinée » des messages dans l'environnement de travail ». *Activites* 04(1). doi:10.4000/activites.1370.
Davat, Ambre. 2023. « Biais, intelligence artificielle et technosolutionnisme ». *Éthique, politique, religions* 67-83. doi:10.48611/ISBN.978-2-406-15078-7.P.0067.
Daviet, Sylvie. 2000. « Emergence et structuration d'une multinationale européenne du semi-conducteur : le cas de ST Microelectronics ». *Annales de Géographie* 109(612):132-51. doi:10.3406/geo.2000.1884.
Dejours, Christophe. 2016. « Souffrance et plaisir au travail. L'approche par la psychopathologie du travail ». *Travailler* 35(1):17-30. doi:10.3917/trav.035.0017.
Dejours, Christophe, Simon Cottin-Marx, et Stéphane Le Lay. 2021. « « Il faut une théorie de la coopération, du travail vivant individuel et collectif. » ». *Mouvements* 106(2):27-40. doi:10.3917/mouv.106.0027.
Demenus, Ysée. 2024. « Isère. "De l'eau, pas des puces" : ils ont manifesté contre STMicro, Soitec et l'industrie grenobloise ». *Le Dauphiné libéré*, avril 6.
Denis, Jérôme, et Houssem Assadi. 2005. « Les usages de l'e-mail en entreprise. Efficacité dans le travail ou surcharge informationnelle ? » P. 135 in. Hermes.
Denis, Jérôme, et David Pontille. 2010. *Petite sociologie de la signalétique: les coulisses des panneaux du métro*. Collection Sciences sociales. Paris: Mines, ParisTech-Presses des Mines.
Denis, Jérôme, et David Pontille. 2022. *Le soin des choses. Politiques de la maintenance*. Terrains philosophiques. Paris: la Découverte.
Denton, Remi, Alex Hanna, Razvan Amironesei, Andrew Smart, et Hilary Nicole. 2021. « On the Genealogy of Machine Learning Datasets: A Critical History of ImageNet ». *Big Data & Society* 8(2):1-14. doi:10.1177/20539517211035955.

Denton, Remi, Alex Hanna, Razvan Amironesei, Andrew Smart, Hilary Nicole, et Morgan Klaus Scheuerman. 2020. « Bringing the People Back In: Contesting Benchmark Machine Learning Datasets ». in *Proceedings of ICML Workshop on Participatory Approaches to Machine Learning*.
Deonna, Waldemar. 1952. « Ouroboros ». *Artibus Asiae* 15(1/2):63/70.
Dequeant, Kean, Philippe Vialletelle, Pierre Lemaire, et Marie-Laure Espinouse. 2016. « A literature review on variability in semiconductor manufacturing: The next forward leap to Industry 4.0 ». P. 2598-2609 in *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*.
Descartes, René. [1637] 2016. *Discours de la méthode. Pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*. Éd. avec dossier. GF. Paris: Flammarion.
Deumier, Nathalie. 2025. « ST Microelectronics doit supprimer 1000 emplois en France, le site de Rousset sera peut-être concerné ». *France 3 Provence-Alpes-Côte d'Azur*, avril 30.
Dewey, John. [1938] 2006. *Logique : la théorie de l'enquête*. Paris: Presses Universitaires de France.
Dhaliwal, Ranjodh Singh, Théo Lepage-Richer, et Lucy Suchman. 2024. *Neural Networks*. In Search of Media. Minneapolis Lüneburg, Germany: University of Minnesota Press meson press.
Dodier, Nicolas. 1995. *Les Hommes et les Machines. La conscience collective dans les sociétés technicisées*. Éditions Métailié.
Dodier, Nicolas, et Janine Barbot. 2016. « La force des dispositifs ». *Annales. Histoire, Sciences Sociales* 71(02):421-48. doi:10.1353/ahs.2016.0064.
Dooley, Kevin. 2002. « Organizational Complexity ». *International Encyclopedia of Business and Management* 5013-22.
Dorschel, Robert. 2022. « Reconsidering Digital Labour: Bringing Tech Workers into the Debate ». *New Technology, Work and Employment* 37(2):288-307. doi:10.1111/ntwe.12225.
Dos Santos, Leonardo Moraes Aguiar Lima, Matheus Becker Da Costa, João Victor Kothe, Guilherme Brittes Benitez, Jones Luís Schaefer, Ismael Cristofer Baierle, et Elpidio Oscar Benitez Nara. 2020. « Industry 4.0 Collaborative Networks for Industrial Performance ». *Journal of Manufacturing Technology Management* 32(2):245-65. doi:10.1108/JMTM-04-2020-0156.
Dourish, Paul. 2016. « Algorithms and Their Others: Algorithmic Culture in Context ». *Big Data & Society* 3(2):1-11. doi:10.1177/2053951716665128.
Dribbusch, Heiner, et Peter Birke. 2019. *Les syndicats allemands. Défis en période de transition*. Travail et justice sociale. Berlin: Friedrich-Ebert-Stiftung, Département Analyse de la politique internationale.
Duane, Anna Mae. 2025. « Teenagers turning to AI companions are redefining love as easy, unconditional and always there ». *The Conversation*, février 12.
Dubar, Claude. 1996. « La sociologie du travail face à la qualification et à la compétence ». *Sociologie du travail* 38(2):179-93. doi:10.3406/sotra.1996.2268.
Duclos, Anne-Marie. 2015. « La résistance au changement : un concept désuet et inapproprié en éducation ». *Psychologie & Éducation* 1:33-45.
Durri, Ilda, Charalampos Stylogiannis, et Mathias Wouters. 2025. « Directive sur le travail via une plateforme : étape importante ou insignifiante ? » P. 91-110 in *Bilan social de l'Union européenne 2024. L'Europe sociale face aux paradigmes de sécurité et de compétitivité*, édité par S. Sabato, D. Ghailani, et S. Spasova.
Echajari, Loubna, Hugo Jeanningros, et Myriam Lewkowicz. 2024. « Le codage de l'information médicale à l'épreuve de l'IA. Performance et incertitude du codage en centre hospitalier ». *Réseaux* 248(6):153-91. doi:10.3917/res.248.0153.
Elish, Madeleine C., et danah boyd. 2018. « Situating Methods in the Magic of Big Data and AI ». *Communication Monographs* 85(1):57-80. doi:10.1080/03637751.2017.1375130.
Ellul, Jacques. 1990. *La technique, ou, L'enjeu du siècle*. 2e éd. rev. Classiques des sciences sociales. Paris: Economica.

Elrod, P. David, et Donald D. Tippett. 2002. « The “Death Valley” of Change ». *Journal of Organizational Change Management* 15(3):273-91. doi:10.1108/09534810210429309.
Ericher, Madlie, Johan Seux, Siessima Toe, et Lucie Tournier. 2025. *Les semi-conducteurs : un marché mondialisé et une dépendance européenne*. Direction générale des Entreprises.
Erz, Hendrik. 2023. « “Pause Giant AI Experiments”: An Open Letter Full of Straw Men ». *Hendrik Erz, Personal Website*. https://www.hendrik-erz.de/post/pause-giant-ai-experiments-an-open-letter-full-of-straw-men.
Escande, Philippe. 2021. « TSMC, une brève histoire de la mondialisation... et de ses limites ». *Le Monde*, octobre 15.
Evans, Leighton, et Rob Kitchin. 2018. « A Smart Place to Work? Big Data Systems, Labour, Control and Modern Retail Stores ». *New Technology, Work and Employment* 33(1):44-57. doi:10.1111/ntwe.12107.
Faciléco. 2018. « La valeur ajoutée, qu’est-ce que c’est ? » https://www.economie.gouv.fr/facileco/definition-valeur-ajoutee.
Favier-Baron, Eugène. 2023. « Que fait l’Intelligence Artificielle à l’intelligence ? » *Appareil* (26). doi:10.4000/appareil.6943.
Favret-Saada, Jeanne. 1990. « Être affecté ». *Gradhiva : revue d’histoire et d’archives de l’anthropologie* 8(1):3-9. doi:10.3406/gradh.1990.1340.
Fedirko, Oleksandr, et Nataliia Fedirko. 2021. « Evolution of EU Innovation Policy ». *International Economic Policy* 2(35):76-99. doi:10.33111/iep.2021.35.04.
Ferguson, Yann. 2019. « Ce que l’intelligence artificielle fait de l’homme au travail. Visite sociologique d’une entreprise ». P. 23-42 in *Les mutations du travail*, *Recherches/Fondation pour les sciences sociales*, édité par F. Dubet. La Découverte.
Ferguson, Yann. 2025a. *L’intelligence artificielle au travail. Accompagner & sécuriser les initiatives collaborateurs.* datacraft & Inria.
Ferguson, Yann. 2025b. *L’intelligence artificielle au travail. Accompagner & sécuriser les initiatives collaborateurs. Synthèse*. Inria & DataCraft. https://datacraft.paris/wp-content/uploads/2025/06/Synthese-Inria-x-datacraft.pdf.
Ferguson, Yann, David Rodriguez, Didier Chabanet, et Damien Richard. 2024. « Explicabilité et conditions d’appropriation de l’intelligence artificielle : une ressource au service du management ?: » *Question(s) de management* n° 49(2):131-41. doi:10.3917/qdm.229.0131.
Fernández-Macías, Enrique, et Martina Bisello. 2020. *A Taxonomy of Tasks for Assessing the Impact of New Technologies on Work*. JRC120618. Seville: European Commission.
Fiant, Océane, Camille Franchet, et Robin Schwob. 2024. « Au-delà de l’explicabilité. Étude de la conception d’une intelligence artificielle intelligible en anatomie et cytologie pathologiques ». *Réseaux* 248(6):73-110. doi:10.3917/res.248.0073.
Fischer, Daniel, Patrick Moder, et Hans Ehm. 2021. « Investigation of Predictive Maintenance for Semiconductor Manufacturing and its Impacts on the Supply Chain ». P. 1409-16 in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Vol. 1.
Fischer, Flora. 2019. « L’éthique by design du numérique : généalogie d’un concept ». *Sciences du Design* n°10(2):61. doi:10.3917/sdd.010.0061.
Flécher, Marion. 2024. « L’informatique : un bastion masculin… mais égalitaire ? Logiques et modalités de la féminisation des filières et des métiers de l’informatique ». P. 7-24 in *Premiers pas sur le marché du travail : quand les inégalités s’en mêlent - Tome 1*, édité par T. Couppié, D. Épiphane, O. Joseph, et E. Personnaz. Marseille: Céreq.
Flichy, Patrice. 2008. « Technique, usage et représentations ». *Réseaux* 148149(2):147-74. https://shs.cairn.info/revue-reseaux1-2008-2-page-147.
FO-Cadres. 2023. *Intelligence artificielle et travail. Plaidoyer pour un dialogue social technologique*. https://foc.media.fo-

cadres.fr/Intelligence_artificielle_et_travail_Plaidoyer_pour_un_dialogue_social_technologique_072c0f9f80.pdf.
Ford, Martin. 2018. *Architects of Intelligence: The Truth about AI from the People Building It*. First published: November 2018. Birmingham, UK: Packt Publishing.
Fore, Preston. 2025. « Billionaire Bill Gates Says a 2-Day Work Week Is Coming in Just 10 Years, Thanks to AI Replacing Humans 'for Most Things' ». *Fortune*, avril.
Forsythe, Diana E. 1993a. « Engineering Knowledge: The Construction of Knowledge in Artificial Intelligence ». *Social Studies of Science* 23(3):445-77. doi:10.1177/030631279302300302.
Forsythe, Diana E. 1993b. « The Construction of Work in Artificial Intelligence ». *Science, Technology, & Human Values* 18(4):460-79. doi:10.1177/016224399301800404.
Forsythe, Diana E. 2001. *Studying Those Who Study Us. An Anthropologist in the World of Artificial Intelligence*. Orig. printing. édité par D. J. Hess. Writing Science. Stanford, Calif: Stanford University Press.
Forum économique mondial. 2015. *Deep Shift. Technology Tipping Points and Societal Impact*. https://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf.
Foucault, Michel. [1969] 2008. *L'archéologie du savoir*. Tel. Paris: Gallimard.
Francequin, Ginette. 2008. *Le vêtement de travail, une deuxième peau*. Sociologie clinique. Ramonville-Saint-Agne: Érès éd.
Freedman, Jonathan L., et Scott C. Fraser. 1966. « Compliance without Pressure: The Foot-in-the-Door Technique. » *Journal of Personality and Social Psychology* 4(2):195-202. doi:10.1037/h0023552.
Freiman, Ori. 2023. « Making Sense of the Conceptual Nonsense 'Trustworthy AI' ». *AI and Ethics* 3(4):1351-60. doi:10.1007/s43681-022-00241-w.
Frey, Carl Benedikt, et Michael A. Osborne. [2013] 2017. « The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation? » *Technological Forecasting and Social Change* 114:254-80. doi:10.1016/j.techfore.2016.08.019.
Friedman, Jane. 2019. « Checking Again ». *Philosophical Issues* 29(1):84-96. doi:10.1111/phis.12141.
Friedmann, Georges. 1964. *Le travail en miettes*. Idées. Paris: Gallimard.
Frieske, Benjamin, et Sylvia Stieler. 2022. « The "Semiconductor Crisis" as a Result of the COVID-19 Pandemic and Impacts on the Automotive Industry and Its Supply Chains ». *World Electric Vehicle Journal* 13(10):189. doi:10.3390/wevj13100189.
Fuchs, Christian. 2011. « Web 2.0, Prosumption, and Surveillance ». *Surveillance & Society* 8(3):288-309.
Fuchs, Christian. 2018. « Industry 4.0: The Digital German Ideology ». *tripleC: Communication, Capitalism & Critique. Open Access Journal for a Global Sustainable Information Society* 16(1):280-89.
Future of Life Institute. 2023. « Pause Giant AI Experiments: An Open Letter ».
Gaborieau, David. 2012. « « Le nez dans le micro ». Répercussions du travail sous commande vocale dans les entrepôts de la grande distribution alimentaire ». *La Nouvelle Revue du Travail* (1). doi:10.4000/nrt.240.
Gaborieau, David. 2017. « Quand l'ouvrier devient robot: Représentations et pratiques ouvrières face aux stigmates de la déqualification ». *L'Homme et la société* 205(3):245. doi:10.3917/lhs.205.0245.
Gaglio, Gérald, et Alain Loute. 2023. « L'émergence d'enjeux éthiques lors d'expérimentations de logiciels d'intelligence artificielle: Le cas de la radiologie ». *Réseaux* N° 240(4):145-78. doi:10.3917/res.240.0145.
Gallego, Aina, et Thomas Kurer. 2022. « Automation, Digitalization, and Artificial Intelligence in the Workplace: Implications for Political Behavior ». *Annual Review of Political Science* 25(1):463-84. doi:10.1146/annurev-polisci-051120-104535.

Galper, Ari Brendan. 2020. « Accommodation-through-Bypassing: Overcoming Professionals' Resistance to the Implementation of Algorithmic Technology ». Sociologie, MIT.
Gamkrelidze, Tamari. 2022. « Des discours aux réalités de la conception, du déploiement et des usages des systèmes d'Intelligence Artificielle dans les situations de travail ». phdthesis, HESAM Université.
Ganascia, Jean-Gabriel. 2019. *Le mythe de la Singularité: faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Paris: Points.
Gartner. 2024. « Gartner Says Worldwide Semiconductor Revenue Declined 11% in 2023 ». https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-01-16-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-declined-11-percent-in-2023.
Gebru, Timnit, et Émile P. Torres. 2024. « The TESCREAL Bundle: Eugenics and the Promise of Utopia through Artificial General Intelligence ». *First Monday* 29(4). doi:10.5210/fm.v29i4.13636.
Geertz, Clifford. 1973. *The Interpretation of Cultures. Selected Essays*.
Gekara, Victor Oyaro, et Peter Fairbrother. 2013. « Managerial Technologies and Power Relations: A Study of the Australian Waterfront ». *New Technology, Work and Employment* 28(1):51-65. doi:10.1111/ntwe.12003.
Gekara, Victor Oyaro, et Vi-Xuan Thanh Nguyen. 2018. « New Technologies and the Transformation of Work and Skills: A Study of Computerisation and Automation of Australian Container Terminals ». *New Technology, Work and Employment* 33(3):219-33. doi:10.1111/ntwe.12118.
Gell, Alfred. 1988. « Technology and Magic ». *Anthropology Today* 4(2):6. doi:10.2307/3033230.
Gentil, Marie-Helene, et Catherine Merle. 2021. « Vers un système d'évaluation de la performance globale et multidimensionnelle de l'usine du futur ». in *CIGI QUALITA 2021*. Grenoble.
Giddens, Anthony. 1984. *The Constitution of Society. Outline of the Theory of Structuration*. Cambridge [Cambridgeshire]: Polity Press.
Gilbert, Patrick, et Nathalie Raulet-Croset. 2023. « Qu'est-ce qu'une enquête de terrain en management ? » P. 20-41 in *L'enquête de terrain en management*, *Versus*. EMS Editions.
Gillespie, Tarleton. 2014. « The Relevance of Algorithms ». P. 167-94 in *Media Technologies*, édité par T. Gillespie, P. J. Boczkowski, et K. A. Foot. The MIT Press.
Ginzberg, Eli. 1982. « The Mechanization of Work ». *Scientific American* 247(3):66-75.
Girard-Chanudet, Camille. 2023a. « La justice algorithmique en chantier. Sociologie du travail et des infrastructures de l'intelligence artificielle ». Sociologie, EHESS.
Girard-Chanudet, Camille. 2023b. « Le travail de l'Intelligence Artificielle : concevoir et entraîner un outil de pseudonymisation automatique à la Cour de Cassation ». *RESET* 12:1-22. doi:10.4000/reset.4731.
Girard-Chanudet, Camille. 2023c. « « Mais l'algo, là, il va mimer nos erreurs ! »: Contraintes et effets de l'annotation des données d'entraînement d'une IA ». *Réseaux* N° 240(4):111-44. doi:10.3917/res.240.0111.
Girard-Chanudet, Camille. 2025. « Ground-Truth Is Law: The Invisible Conceptual Work behind AI ». *Big Data & Society* 12(2):20539517251352823. doi:10.1177/20539517251352823.
Giraud, Pierre-Noël. 2001. *Le commerce des promesses: petit traité sur la finance moderne*. Économie humaine. Paris: Éd. du Seuil.
Gitelman, Lisa, éd. 2013. *« Raw Data » Is an Oxymoron*. Infrastructures Series. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
Glaser, Barney G., et Anselm L. Strauss. [1967] 2022. *La découverte de la théorie ancrée: stratégies pour la recherche qualitative*. Sociologia. Malakoff: Armand Colin.
Glaser, Vern L., Neil Pollock, et Luciana D'Adderio. 2021a. « The Biography of an Algorithm: Performing Algorithmic Technologies in Organizations ». *Organization Theory* 2(2):26317877211004609. doi:10.1177/26317877211004609.

Glaser, Vern L., Neil Pollock, et Luciana D'Adderio. 2021b. « The Biography of an Algorithm: Performing Algorithmic Technologies in Organizations ». *Organization Theory* 2(2):26317877211004609. doi:10.1177/26317877211004609.
Global Semiconductor Alliance et Accenture. 2022. *GSA Brief: Women in the semiconductor industry 2022*. https://www.gsaglobal.org/wp-content/uploads/2022/11/GSA-ACN-2022-Women-in-Semiconductor-BRIEF-Final.pdf.
Gobena, Elina. 2024. « Unboxing Reskilling Narratives: Analysing Practice, Agency and Signifier in Social Media ». *New Technology, Work and Employment* 39(3):335-61. doi:10.1111/ntwe.12299.
Godé, Cécile, Jean-Fabrice Lebraty, et Pierre Barbaroux. 2023. « D'un système d'information résilient a un système d'information anti-fragile ? Illustrations à partir des organisations militaires ». *Les Cahiers Risques et Résilience*.
Godé-Sanchez, Cécile. 2008. « Les TIC comme leviers du changement organisationnel : une analyse du cas des Armées américaines en Afghanistan ». *Systèmes d'information & management* 13(1):7-30. doi:10.3917/sim.081.0007.
Goertzel, Ben. 2010. *A Cosmist Manifesto: Practical Philosophy for the Posthuman Age*. Lexington: Humanity Plus Press.
Gourlet, Pauline, Donato Ricci, et Maxime Crépel. 2024. « Reclaiming Artificial Intelligence Accounts: A Plea for a Participatory Turn in Artificial Intelligence Inquiries ». *Big Data & Society* 11(2):20539517241248093. doi:10.1177/20539517241248093.
Gouvernement français. 2016. *Nouvelle France Industrielle. Construire l'industrie française du futur*. https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/nouvelle-france-industrielle/industrie-du-futur-dp-2016-05-23.pdf.
Gouvernement français. 2021. *Stratégie Nationale pour l'Intelligence Artificielle – 2e phase*. Gouvernement français.
Gouvernement français. 2022. *Électronique 2030. Dossier de presse*. Crolles, Isère.
Gouvernement français. 2025a. *Faire de la France une puissance de l'IA*. *Dossier de presse*.
Gouvernement français. 2025b. *Osez l'IA : le plan pour diffuser l'IA dans toutes les entreprises*.
Graur, Ioana, Dmitry Vengertsev, Ananthan Raghunathan, Ian Stobert, et Jed Rankin. 2015. « New Method of Detection and Classification of Yield-Impacting EUV Mask Defects ». P. 96350M in, édité par N. Hayashi et B. S. Kasprowicz. Monterey, California, United States.
Greenan, Nathalie, et Silvia Napolitano. 2021. *Why Do Employees Participate in Innovation ? Skills and Organisation Design Issues and the Ongoing Technological Transformation*. Document de Travail. Noisy-le-Grand: Centre d'études de l'emploi et du travail.
Greenan, Nathalie, Silvia Napolitano, et Justin Pillosio. 2024. « L'IA dans les entreprises : que révèlent les accords négociés ? » *Connaissance de l'emploi* 200:1-4.
Greenan, Nathalie, Silvia Napolitano, Eva Katharina Sarter, Chris Warhurst, et Sally Wright. 2023. *From platform work to the platformisation of work: a European statistical analysis*. Projet Beyond 4.0. https://www.beyond4-0.eu/storage/publications/D5.1%20Analysing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation/D5.1%20Analysing%20the%20socio-economic%20consequences%20of%20the%20technological%20transformation.pdf.
Grosman, Jérémy, et Tyler Reigeluth. 2019. « Perspectives on Algorithmic Normativities: Engineers, Objects, Activities ». *Big Data & Society* 6(2):1-12. doi:10.1177/2053951719858742.
Gruber, Harald. 2000. « The evolution of market structure in semiconductors: the role of product standards ». *Research Policy* 29(6):725-40. doi:10.1016/S0048-7333(99)00046-3.
Gueant, J. 2022. « "Le modèle grenoblois est à dupliquer": entretien avec Bruno Le Maire, en déplacement à Crolles pour défendre la souveraineté industrielle française ». *France 3 Auvergne-Rhône-Alpes*, juillet 12.

Guédot, Valérie. 2023. « « Intelligence artificielle : sommes-nous prêts ? » ». https://www.radiofrance.fr/franceinter/intelligence-artificielle-sommes-nous-prets-6699930.
Guillaud, Hubert. 2025. *Les algorithmes contre la société*. Paris: la Fabrique éditions.
Haakman, Mark, Luís Cruz, Hennie Huijgens, et Arie Van Deursen. 2021. « AI Lifecycle Models Need to Be Revised: An Exploratory Study in Fintech ». *Empirical Software Engineering* 26(5):95. doi:10.1007/s10664-021-09993-1.
Habermas, Jürgen. [1983] 1999. *Morale et communication*. Paris: Flammarion.
Hagel III, John, John Seely Brown, et Lang Davison. 2009. *The Big Shift. Why It Matters*. Deloitte Center for the Edge. https://www.johnseelybrown.com/bigshiftwhyitmatters.pdf.
Haipeter, Thomas. 2020. « Digitalisation, Unions and Participation: The German Case of 'Industry 4.0' ». *Industrial Relations Journal* 51(3):242-60. doi:10.1111/irj.12291.
Hancké, Bob, et Angela Garcia Calvo. 2022. « Mister Chips Goes to Brussels: On the Pros and Cons of a Semiconductor Policy in the EU ». *Global Policy* 13(4):585-93. doi:10.1111/1758-5899.13096.
Hannan, Michael T., et John Freeman. 1984. « Structural Inertia and Organizational Change ». *American Sociological Review* 49(2):149-64.
Haraway, Donna. 1988. « Situated Knowledges: The Science Question in Feminism and the Privilege of Partial Perspective ». *Feminist Studies* 14(3):575-99.
Hart, Robert. 2024. « Boom de l'IA : la start-up xAI d'Elon Musk valorisée à près de 18 milliards de dollars grâce à un nouveau financement ». *Forbes France*, mai 13.
Hatchuel, Armand, et Benoît Weil. 1992. *L'expert et le système: gestion des savoirs et métamorphose des acteurs dans l'entreprise industrielle, suivi de quatre histoires de systèmes-experts*. Paris: Economica.
Heaven, Will Douglas. 2024. « Geoffrey Hinton, AI Pioneer and Figurehead of Doomerism, Wins Nobel Prize ». *MIT Technology Review*, octobre 8.
Heimstädt, Cornelius. 2023. « Making Plant Pathology Algorithmically Recognizable ». *Agriculture and Human Values*. doi:10.1007/s10460-023-10419-5.
Helm, Paula, Benjamin Lipp, et Roser Pujadas. 2024. « Generating Reality and Silencing Debate: Synthetic Data as Discursive Device ». *Big Data & Society* 11(2):20539517241249447. doi:10.1177/20539517241249447.
Hempel, Carl G., et Paul Oppenheim. 1948. « Studies in the Logic of Explanation ». *Philosophy of Science* 15(2):135-75. doi:10.1086/286983.
Héng, Jean. 2023. *Pratique de la maintenance préventive: mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, froid*. 4e éd. Collection Technique & ingénierie. Malakoff: Dunod.
Henriksen, Anne, et Anja Bechmann. 2020. « Building Truths in AI: Making Predictive Algorithms Doable in Healthcare ». *Information, Communication & Society* 23(6):802-16. doi:10.1080/1369118X.2020.1751866.
Henriksen, Anne, et Lasse Blond. 2023. « Executive-Centered AI? Designing Predictive Systems for the Public Sector ». *Social Studies of Science* 53(5):738-60. doi:10.1177/03063127231163756.
Houzé, Emmanuel, et Régis Meissonier. 2018. « Sociomatérialité contre Sociomatérialité : dépasser un clivage par l'affordance de la technologie ». P. 1-11 in *23ème colloque de l'Association Information et Management*. Montréal, Canada.
Howcroft, Debra, et Phil Taylor. 2014. « 'Plus ca Change, plus La Meme Chose?'—Researching and Theorising the 'New' New Technologies ». *New Technology, Work and Employment* 29(1):1-8. doi:10.1111/ntwe.12026.
Humphreys, Paul. 2004. *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. New York: Oxford University Press USA - OSO.
Hunyadi, Mark. 2015. *La tyrannie des modes de vie: sur le paradoxe moral de notre temps*. Lormont: Le Bord de l'eau.
Hutchby, Ian. 2001. « Technologies, texts and affordances ». *Sociology* 35(2):441-56.

Hutchinson, Ben, Negar Rostamzadeh, Christina Greer, Katherine Heller, et Vinodkumar Prabhakaran. 2022. « Evaluation Gaps in Machine Learning Practice ».
IBM. 2024. « What Is Shadow AI? » https://www.ibm.com/think/topics/shadow-ai.
Ihde, Don, éd. 1990. *Technology and the Lifeworld. From Garden to Earth*. Indiana Series in the Philosophy of Technology. Bloomington: Indiana University Press.
Illich, Ivan. [1973] 2021. *La convivialité*. Nouvelle éd. Points. Paris: Éditions Points.
INSEE. 2025. « Emplois salariés trimestriels - Industrie - Sections B, C, D et E - CVS ». https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/001577235#Telechargement.
Intel. s. d. « Mettre le silicium dans la Silicon Valley : comment fabriquer des... » Consulté 9 octobre 2024. https://www.intel.com/content/www/fr/fr/high-performance-computing/resources/how-wafers-are-made.html.
Irani, Lilly C., et M. Six Silberman. 2013. « Turkopticon: Interrupting Worker Invisibility in Amazon Mechanical Turk ». P. 611-20 in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Paris France: ACM.
Izoard, Celia. 2024. *La ruée minière au XXIe siècle: enquête sur les métaux à l'ère de la transition*. Écocène. Paris: Éditions du Seuil.
Jacob, Elin K. 2004. « Classification and Categorization: A Difference That Makes a Difference ». *Library Trends* 52(3):515-40.
Jacobsen, Benjamin N. 2023. « Machine Learning and the Politics of Synthetic Data ». *Big Data & Society* 10(1):1-12. doi:10.1177/20539517221145372.
Japiot, Olivier, et Bastien Lignereux. 2016. *L'impression 3D et le droit d'auteur : des menaces à prévenir, des opportunités à saisir*. Conseil Supérieur de la Propriété Littéraire et Artistique. https://www.initial.fr/content/uploads/2023/12/CSPLA-Impression-3D.pdf.
Jardat, Rémi. 2012. « De la démocratie en entreprise. Quelques résultats empiriques et propositions théoriques ». *Revue française de gestion* 228229(9):167-84. doi:10.3166/RFG.228-229.167-184.
Jarrige, François. 2014. *Technocritiques: du refus des machines à la contestation des technosciences*. Paris: la Découverte.
Jaton, Florian. 2017. « We Get the Algorithms of Our Ground Truths: Designing Referential Databases in Digital Image Processing ». *Social Studies of Science* 47(6):811-40. doi:10.1177/0306312717730428.
Jaton, Florian. 2019. « « Pardonnez cette platitude » : de l'intérêt des ethnographies de laboratoire pour l'étude des processus algorithmiques ». *Zilsel* 1(5):315-39.
Jaton, Florian. 2020. *The Constitution of Algorithms: Ground-Truthing, Programming, Formulating*. Inside Technology. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
Jaton, Florian. 2025. « Examining Algorithms in the Light of Their Ground Truth Datasets: Results, Objections, and Avenues of Reflection ». *Digital Society* 4(2):1-11. doi:10.1007/s44206-025-00197-4.
Jaujard, François, Cathy Krohmer, et Ewan Oiry. 2025. « L'optimisation de la production de semi conducteurs par l'IA : quelles transformations des interactions homme/système ? » in *Workshop scientifique de la Chaire Industry 4.h*. Grenoble, France.
Javaid, Mohd, Abid Haleem, et Rajiv Suman. 2023. « Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review ». *Cognitive Robotics* 3:71-92. doi:10.1016/j.cogr.2023.04.003.
Jensen, Pablo. 2021. *Deep earnings: le néolibéralisme au coeur des réseaux de neurones*. Interventions. Caen: C&F éditions.
Ji, Kan, Lize Nauta, et Jeffrey Powell. 2023. « Mapping Global Supply Chains – The Case of Semiconductors ». https://www.rabobank.com/knowledge/d011371771-mapping-global-supply-chains-the-case-of-semiconductors.
Jobin, Anna, Marcello Ienca, et Effy Vayena. 2019. « The Global Landscape of AI Ethics Guidelines ». *Nature Machine Intelligence* 1(9):389-99. doi:10.1038/s42256-019-0088-2.

Johns, Jennifer. 2019. « Davos: leaders talk about globalisation as though it's inevitable – when it isn't ». http://theconversation.com/davos-leaders-talk-about-globalisation-as-though-its-inevitable-when-it-isnt-110216.
Joly, Pierre-Benoît. 2010. « On the Economics of Techno-Scientific Promises ». P. 203-21 in *Débordements : Mélanges offerts à Michel Callon*, *Sciences sociales*, édité par M. Akrich, Y. Barthe, F. Muniesa, et P. Mustar. Paris: Presses des Mines.
Joly, Pierre-Benoit. 2015. « Le régime des promesses technoscientifiques ». P. 31-48 in *Sciences et technologies émergentes : Pourquoi tant de promesses*, édité par M. Audétat. Paris.
Jonsson, Katrin, Lars Mathiassen, et Jonny Holmström. 2018. « Representation and Mediation in Digitalized Work: Evidence from Maintenance of Mining Machinery ». *Journal of Information Technology* 33(3):216-32. doi:10.1057/s41265-017-0050-x.
Julia, Luc, et Ondine Khayat. 2019. *L'intelligence artificielle n'existe pas*. Paris: First éditions.
Kaabi-Harrath, Jihène. 2004. « Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance dans les systèmes de production. » Automatique / Robotique, Université de Franche-Comté.
Kadadi, Anirudh, Rajeev Agrawal, Christopher Nyamful, et Rahman Atiq. 2014. « Challenges of Data Integration and Interoperability in Big Data ». in *IEEE International Conference on Big Data*.
Kahmann, Marcus. 2021. « Allemagne. L'Industrie 4.0 : vers la digitalisation concertée de l'industrie manufacturière ? » *Chronique Internationale de l'IRES* 173(1):33-48. doi:10.3917/chii.173.0033.
Kaji, Hossein. 2020. « Ihde's Encounter with "Technological Determinism" in Technology and the Lifeworld ».
Kang, Edward B. 2023. « Ground Truth Tracings (GTT): On the Epistemic Limits of Machine Learning ». *Big Data & Society* 10(1):1-12. doi:10.1177/20539517221146122.
Kant, Immanuel. [1785] 1993. *Fondements de la métaphysique des moeurs*. Le livre de poche Classiques de la philosophie. Paris: Librairie Générale Française.
Kaufmann, Jean-Claude. 2011. *L'entretien compréhensif*. 3e éd. L'enquête et ses méthodes. Paris: A. Colin.
Kellogg, Katherine C., Melissa A. Valentine, et Angéle Christin. 2020. « Algorithms at Work: The New Contested Terrain of Control ». *Academy of Management Annals* 14(1):366-410. doi:10.5465/annals.2018.0174.
Kelly, Dawn, et Terry L. Amburgey. 1991. « Organizational Inertia and Momentum: A Dynamic Model of Strategic Change ». *The Academy of Management Journal* 34(3):591-612.
Kessler, Eric H., et Alok K. Chakrabarti. 1996. « Innovation Speed: A Conceptual Model of Context, Antecedents, and Outcomes ». *The Academy of Management Review* 21(4):1143-91.
Kim, Eugene. 2025. « Amazon Loves AI, except When Candidates Use It in Their Job Interviews ». *Business Insider*, mai 27.
Kirtchik, Olessia, et Francesca Musiani. 2025. « Vers un « État-automate » ? » *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales* (20):101-26. doi:10.4000/1431f.
Kitchin, Rob. 2014a. « Big Data, New Epistemologies and Paradigm Shifts ». *Big Data & Society* 1(1):2053951714528481. doi:10.1177/2053951714528481.
Kitchin, Rob. 2014b. *The Data Revolution. Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences*. Los Angeles, Calif: Sage.
Kitchin, Rob. 2017. « Thinking Critically about and Researching Algorithms ». *Information, Communication & Society* 20(1):14-29. doi:10.1080/1369118X.2016.1154087.
Kitchin, Rob. 2025. *Critical Data Studies: An A to Z Guide to Concepts and Methods*. Cambridge Hoboken: polity.
Kleinberg, Jon, Sendhil Mullainathan, et Manish Raghavan. 2016. « Inherent Trade-Offs in the Fair Determination of Risk Scores ». in *Proceedings of Innovations in Theoretical Computer Science (ITCS)*.
Kloetzli, Sophie. 2025. « Qui est derrière Anti-tech résistance, le collectif « le plus radical de notre époque » ? » *Usbek & Rica*, mai.

Knight, Will. 2017. « The Dark Secret at the Heart of AI ». https://www.technologyreview.com/2017/04/11/5113/the-dark-secret-at-the-heart-of-ai/.
Knuth, Donald Ervin. 1968. *The Art of Computer Programming*. Addison-Wesley Series in Computer Science and Information Processing. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
Kœnig, Gérard. 1994. « L'apprentissage organisationnel : repérage des lieux ». *Revue française de gestion* 97.
Kohler, Dorothée, et Jean-Daniel Weisz. 2018. « Industrie 4.0, une révolution industrielle et sociétale ». *Futuribles* 424(3):47-68. doi:10.3917/futur.424.0047.
Kohlgrüber, Michael, Clara Behrend, Adrian Göttin, Mathias Cuypers, Chris Warhurst, et Sally Wright. 2021. *Understanding future skills and enriching the skills debate - second report*. Projet Beyond 4.0. https://beyond4-0.eu/storage/publications/D6.1%20Understanding%20future%20skills%20and%20enriching%20the%20skills%20debate.%20Full%20version./BEY4.0_WP06_Task_6.1_Report%20overview%20new%20skills.pdf.
Korte, Russell F. 2009. « How Newcomers Learn the Social Norms of an Organization: A Case Study of the Socialization of Newly Hired Engineers ». *Human Resource Development Quarterly* 20(3):285-306. doi:10.1002/hrdq.20016.
Kraemer, Felicitas, Kees van Overveld, et Martin Peterson. 2011. « Is There an Ethics of Algorithms? » *Ethics and Information Technology* 13(3):251-60. doi:10.1007/s10676-010-9233-7.
Kranzberg, Melvin. 1986. « Technology and History: "Kranzberg's Laws" ». *Technology and Culture* 27(3):544-60.
Kraut, Robert E., Ronald E. Rice, Colleen Cool, et Robert S. Fish. 1998. « Varieties of Social Influence: The Role of Utility and Norms in the Success of a New Communication Medium ». *Organization Science* 9(4):437-53. doi:10.1287/orsc.9.4.437.
Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, et Geoffrey E. Hinton. 2017. « ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks ». *Communications of the ACM* 60(6):84-90. doi:10.1145/3065386.
Kübler-Ross, Elisabeth. 1975. *Les derniers instants de la vie*. Classiques. Genève (Suisse): Labor et fides.
Kuhn, Thomas Samuel. 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.
Kumar, Ashok. 2007. « From Mass Customization to Mass Personalization: A Strategic Transformation ». *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19(4):533-47. doi:10.1007/s10696-008-9048-6.
Kurzweil, Ray. 2005. *The singularity is near: when humans transcend biology*. New York: Viking.
Kurzweil, Ray. 2024. *The singularity is nearer: when we merge with AI*. New York: Viking.
Kustosz, Isabelle. 2012. « Institutionnalisation de l'activité de recherche à travers le cas du programme cadre de recherche et de développement technologique de l'Union européenne ». These de doctorat, Lille 1.
Lahire, Bernard. 2012. « Des effets délétères de la division scientifique du travail sur l'évolution de la sociologie ». *SociologieS*. doi:10.4000/sociologies.3799.
Laïnae, Julia, et Nicolas Alep. 2020. *Contre l'alternumérisme: pourquoi nous ne vous proposerons pas d'écogestes numériques ni de solutions pour une démocratie numérique*. Saint-Michel-de-Vax: Éditions la Lenteur.
Lange, Ann-Christina. 2016. « Organizational Ignorance: An Ethnographic Study of High-Frequency Trading ». *Economy and Society* 45(2):230-50. doi:10.1080/03085147.2016.1220665.
Lassaube, Gaïa. 2019. « Cassandre appelant de ses vœux la catastrophe : quand Laurent Alexandre écrivait de la science-fiction ». *Zilsel* 6(2):389-416. doi:10.3917/zil.006.0389.
Latour, Bruno. 2007. « Pensée retenue, pensée distribuée ». P. 605-15 in *Lieux de savoir*, édité par C. Jacob. Paris: Albin Michel.

Le Cun, Y., B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard, et L. D. Jackel. 1989. « Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition ». *Neural Computation* 1(4):541-51. doi:10.1162/neco.1989.1.4.541.
Le Ludec, Clément, Maxime Cornet, et Antonio A. Casilli. 2023. « The Problem with Annotation. Human Labour and Outsourcing between France and Madagascar ». *Big Data & Society* 10(2):1-13. doi:10.1177/20539517231188723.
Le Monde avec AFP. 2023. « Avec Anthropic, Amazon investit massivement dans l'intelligence artificielle ». septembre 25.
Le Texier, Thibault. 2016. *Le maniement des hommes: essai sur la rationalité managériale*. Paris: la Découverte.
Lebovitz, Sarah, Natalia Levina, et Hila Lifshitz-Assa. 2021. « Is AI Ground Truth Really True? The Dangers of Training and Evaluating AI Tools Based on Experts' Know-What ». *MIS Quarterly* 45(3):1501-26. doi:10.25300/MISQ/2021/16564.
Lebrun, Fabien. 2024. *Barbarie numérique: une autre histoire du monde connecté*. Pour en finir avec. Paris: l'Échappée.
Lecarpentier, Maud, et Elsa Lecarpentier. 2024. *Toujours puce. Les macrodégâts de la microélectronique*. Grenoble: le Monde à l'envers.
Lécuyer, Christophe. 2017. « From Clean Rooms to Dirty Water: Labor, Semiconductor Firms, and the Struggle over Pollution and Workplace Hazards in Silicon Valley ». *Information & Culture* 52(3):304-33.
Lécuyer, Christophe, et Hyungsub Choi. 2012. « Les secrets de la Silicon Valley ou les entreprises américaines de microélectronique face à l'incertitude technique ». *Revue d'histoire moderne et contemporaine* 59-3(3):48. doi:10.3917/rhmc.593.0048.
Lefilliâtre, Jérôme. 2024. « Bruno Le Maire, une reconversion très stratégique dans les semi-conducteurs ». *Le Monde (site web)*.
Leonardi, Paul M. 2010. « Digital Materiality? How Artifacts without Matter, Matter ». *First Monday*. doi:10.5210/fm.v15i6.3036.
Leonardi, Paul M. 2012. « Materiality, Sociomateriality, and Socio-Technical Systems: What Do These Terms Mean? How Are They Related? Do We Need Them? »
Leonardi, Paul M. 2013a. « Theoretical Foundations for the Study of Sociomateriality ». *Information and Organization* 23(2):59-76. doi:10.1016/j.infoandorg.2013.02.002.
Leonardi, Paul M. 2013b. « When Does Technology Use Enable Network Change in Organizations? A Comparative Study of Feature Use and Shared Affordances ». *MIS Quarterly* 37(3):749-75. doi:10.25300/MISQ/2013/37.3.04.
Leonardi, Paul M., et Stephen R. Barley. 2010. « What's Under Construction Here? Social Action, Materiality, and Power in Constructivist Studies of Technology and Organizing ». *Academy of Management Annals* 4(1):1-51. doi:10.5465/19416521003654160.
Letzing, John. 2012. « Google Hires Famed Futurist Ray Kurzweil ». *Wall Street Journal*, décembre 15.
Lewkowicz, Myriam, et Romain Liron. 2019. « The Missing "Turn to Practice" in the Digital Transformation of Industry ». *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* 28(3-4):655-83. doi:10.1007/s10606-019-09347-y.
Li, Bo, Peng Qi, Bo Liu, Shuai Di, Jingen Liu, Jiquan Pei, Jinfeng Yi, et Bowen Zhou. 2023. « Trustworthy AI: From Principles to Practices ». *ACM Computing Surveys* 55(9):1-46. doi:10.1145/3555803.
Li, Mengjun, et Ayoung Suh. 2021. « Machinelike or Humanlike? A Literature Review of Anthropomorphism in AI-Enabled Technology ». P. 4053-62 in *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences*. Vol. 2020-01. Hawaii.
Licoppe, Christian. 2008. « Dans le "carré de l'activité" : perspectives internationales sur le travail et l'activité ». *Sociologie du Travail* 50(3):287-302. doi:10.1016/j.soctra.2008.06.002.

Linnainmaa, Seppo. 1970. « Algoritmin kumulatiivinen pyöristysvirhe yksittäisten pyöristysvirheiden Taylor-kehitelmänä [The representation of the cumulative rounding error of an algorithm as a Taylor expansion of the local rounding errors] ».
Lipton, Zachary C. 2016. « The Mythos of Model Interpretability ». in *2016 ICML Workshop on Human Interpretability in Machine Learning*.
Liu, Chuncheng, et Zhifan Luo. 2025. « China as an Analytical Lens for AI and Society ». *Big Data & Society* 12(4):20539517251389844. doi:10.1177/20539517251389844.
Lloyd, Caroline, et Jonathan Payne. 2023. « Food for Thought: Robots, Jobs and Skills in Food and Drink Processing in Norway and the UK ». *New Technology, Work and Employment* 38(2):272-90. doi:10.1111/ntwe.12194.
Loeve, Sacha. 2011. « « Ceci n'est pas une brouette ». Grands et petits récits des nanotechnologies ». in *Humains, non-humains. Comment repeupler les sciences sociales*. Paris: la Découverte.
Loeve, Sacha. 2015. « La loi de Moore : enquête critique sur l'économie d'une promesse ». P. 91-113 in *Sciences et technologies émergentes: pourquoi tant de promesses?*, édité par M. Audétat. Paris: Hermann.
Loukil, Ridha. 2017a. « La pépite française IPDiA se fond dans la peau du groupe japonais Murata ». *L'Usine Nouvelle*, mars 31.
Loukil, Ridha. 2017b. « Le fondeur de semiconducteurs X-Fab fait de la France le moteur de sa croissance d'ici 3 ans ». *L'Usine Nouvelle*, mars 24.
Luitse, Dieuwertje Maria Rebecca, et Anna Schjøtt Hansen. 2025. « The Politics of Machine Learning Evaluation: From Lab to Industry ». *AoIR Selected Papers of Internet Research*. doi:10.5210/spir.v2024i0.13991.
Lussier-Lejeune, Florence. 2022. « Les acteurs de l'innovation ». in *Attentes et promesses technoscientifiques*. Les Presses de l'Université de Montréal.
Lussier-Lejeune, Florence. 2025. « Le développement de l'intelligence artificielle au Québec à l'aune de l'économie de la promesse ». Science, technologie et société, Université du Québec, Montréal.
Lyko, Klaus, Marcus Nitzschke, et Axel-Cyrille Ngonga Ngomo. 2016. « Big Data Acquisition ». in *New horizons for a data-driven economy: a roadmap for usage and exploitation of big data in Europe*, édité par J. M. Cavanillas, E. Curry, W. Wahlster, et Springer International Publishing. Cham: Springer International Publishing AG.
MacKenzie, Donald A. 2001. *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*. 4. print. Inside Technology. Cambridge, Mass.: MIT Press.
Macron, Emmanuel. 2022. « Discours du Président de la République relatif à la Stratégie Electronique 2030 », juillet 12, Crolles, Isère.
Macron, Emmanuel. 2025. « Discours de clôture du Sommet pour l'action sur l'IA. », février 11.
Maddikunta, Praveen Kumar Reddy, Quoc-Viet Pham, Prabadevi B, N. Deepa, Kapal Dev, Thippa Reddy Gadekallu, Rukhsana Ruby, et Madhusanka Liyanage. 2022. « Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications ». *Journal of Industrial Information Integration* 26:100257. doi:10.1016/j.jii.2021.100257.
Maingueneau, Dominique. 2012. « Que cherchent les analystes du discours ? » *Argumentation et analyse du discours* (9). doi:10.4000/aad.1354.
Malier, Laurent. 2009. *Les sites français de production micro-nanoélectronique*. *Mission confiée par Christian Estrosi, Ministre chargé de l'industrie*.
Malone, Thomas W., Robert Laubacher, et Tammy Johns. 2011. « The Big Idea: The Age of Hyperspecialization ». *Harvard Business Review*, juillet 1.
Manens, François. 2023. « Course à l'intelligence artificielle : même les gourous de la tech prennent peur ». *La Tribune*, mars 30, 7599.
Mann, Nathan. 2024. « L'inondation de carrières de quartz aux Etats-Unis fait trembler le monde des semi-conducteurs et du solaire ». *L'Usine Nouvelle*, octobre 4.

Marcaillou, Laurent. 2012. « Freescale ferme définitivement son usine de Toulouse ». *Les Echos*, août 10.
March, James G. 1991. « Exploration and Exploitation in Organizational Learning ». *Organization Science* 2(1):71-87. https://www.jstor.org/stable/2634940.
Marin, Jérôme. 2023. « Meta n'a vendu que 300 000 paires de ses lunettes connectées ». *Usine Digitale*, août 3.
Marissal, Pierre. 2023. « L'IA : le nouveau nom des délocalisations ». *L'Humanité*, octobre 26.
Markou, Efi, Margot Delon, Laure Hadj, Pauline Barraud de Lagerie, et Stéphanie Abrial. 2024. « À l'ombre des enquêtes, les compensations financières et matérielles ». *Terrains & travaux* 45(2):5-26. doi:10.3917/tt.045.0005.
Martinez-Plumed, Fernando, Lidia Contreras-Ochando, Cesar Ferri, Jose Hernandez-Orallo, Meelis Kull, Nicolas Lachiche, Maria Jose Ramirez-Quintana, et Peter Flach. 2021. « CRISP-DM Twenty Years Later: From Data Mining Processes to Data Science Trajectories ». *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 33(8):3048-61. doi:10.1109/TKDE.2019.2962680.
Maruani, Margaret, et Chantal Nicole-Drancourt. 1989. *Au labeur des dames: métiers masculins, emplois féminins*. Collection Mouvement. Paris: Syros-Alternatives.
Masoudnia, Yaser. 2012. « Bootlegging in High Technology R&D Departments: From Initiation to Disclosure ».
Matthewman, Steve. 2011. *Technology and Social Theory*. Themes in Social Theory. Palgrave Macmillan.
Matuszewski, Paweł, Michał Rams-Ługowski, et Jan Pawłowski. 2024. « From Political Treason to the Metaphysical Struggle between Good and Evil. Levels of Political Conspiracy Theories and Their Consequences for Diffusion ». *Journal of Comparative Politics* 17(1):86-104.
Maudet, Nolwenn, Anaëlle Beignon, et Thomas Thibault. 2024. « Comment les entreprises de la tech nous forcent à utiliser l'IA ». https://limitesnumeriques.fr/travaux-productions/ai-forcing.
Mayer, Anne-Sophie, et Franz Strich. 2024. « Who Am I in the Age of AI? Exploring Dimensions That Shape Occupational Identity in the Context of AI for Decision-Making ». in *Research Handbook on Artificial Intelligence and Decision Making in Organizations*, édité par I. Constantiou, M. P. Joshi, et M. Stelmaszak. Edward Elgar Publishing.
McAfee, Andrew, et Erik Brynjolfsson. 2012. « Big Data: The Management Revolution ». *Harvard Business Review* 90(10):60-68.
McCarthy, John, Marvin Minsky, Nathan Rochester, et Claude Shannon. [1955] 2006. « A Proposal for the Dartmouth Summer Research Projet on Artificial Intelligence ». *AI Magazine*, 12-14.
McCulloch, Warren, et Walter Pitts. 1943. « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity ». *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5:115-33.
McGulre, Linda. 1995. *Case-Studies for Research-Story-Telling or Scientific Method? Working Paper 06/95*. Monash University Faculty of Business and Economics.
Méda, Dominique. 2022. *Le travail*. 7e éd. mise à jour. Que sais-je ? Paris: Que sais-je ?
Meesters, Marcel, Petra Heck, et Alexander Serebrenik. 2022. « What Is an AI Engineer? An Empirical Analysis of Job Ads in The Netherlands ». P. 136-44 in *2022 IEEE/ACM 1st International Conference on AI Engineering – Software Engineering for AI (CAIN)*.
Ménissier, Thierry. 2019. « Quelle éthique pour l'IA ? » P. 11 in *Colloque de l'Académie Delphinale*. Grenoble.
Ménissier, Thierry. 2021. *Innovations : Une enquête philosophique*. Collection « Philosophie ». Paris: Hermann.
Ménissier, Thierry. 2023. « Les quatre éthiques de l'intelligence artificielle ». *Revue d'anthropologie des connaissances* 17(2). https://journals.openedition.org/rac/29961.
Menon, P. S. 2023. « Women in the Semiconductor Manufacturing Workforce ». *IEEE Electron Devices Magazine* 1(3):48-49. doi:10.1109/MED.2023.3335688.

Mensch, Gerhard. 1979. *Stalemate in Technology: Innovations Overcome the Depression*. Cambridge, Mass: Ballinger Pub. Co.
Merton, Robert K. 1948. « The Self-Fulfilling Prophecy ». *The Antioch Review* 8(2):193-210.
Metcalf, Thomas. 2025. « AI Safety and Regulatory Capture ». *AI & SOCIETY*. doi:10.1007/s00146-025-02534-0.
Metz, Rachel. 2024. « Ilya Sutskever, Co-Founder and Chief Scientist, Leaves OpenAI ». *Time*, mai 15.
Miller, Chris. 2022. *Chip War: The Fight for the World's Most Critical Technology*. New York: Scribner.
Miller, Tim. 2018. « Explanation in Artificial Intelligence: Insights from the Social Sciences ». *Artificial Intelligence* 267:1-38. http://arxiv.org/abs/1706.07269.
Millgram, Elijah. 2015. *The Great Endarkenment. Philosophy for an Age of Hyperspecialization*. Oxford: Oxford university press.
Ministère du Travail. 2022. « L'information et la consultation du CSE ». https://travail-emploi.gouv.fr/linformation-et-la-consultation-du-cse.
Mispelblom, Frederik. 1995. *Au-delà de la qualité: démarches qualité, conditions de travail et politiques du bonheur*. Alternatives sociologiques. Paris: Syros.
Moll, Ian. 2022. « The Fourth Industrial Revolution: A New Ideology ». *tripleC: Communication, Capitalism & Critique. Open Access Journal for a Global Sustainable Information Society* 20(1):45-61. doi:10.31269/triplec.v20i1.1297.
Mollick, Ethan. 2024. « Reinventing the Organization for GenAI and LLMs ». https://sloanreview.mit.edu/article/reinventing-the-organization-for-genai-and-llms/.
Moor, James. 2006. « The Dartmouth College Artificial Intelligence Conference: The Next Fifty Years ». *AI Magazine*, 87-91.
Moricot, Caroline. 2020. *Agir à distance: enquête sur la délocalisation du geste technique*. Histoire des techniques. Paris: Classiques Garnier.
Moro, Angelo, Matteo Rinaldini, Jacopo Staccioli, et Maria Enrica Virgillito. 2019. « Control in the Era of Surveillance Capitalism: An Empirical Investigation of Italian Industry 4.0 Factories ». *Journal of Industrial and Business Economics* 46(3):347-60. doi:10.1007/s40812-019-00120-2.
Morozov, Evgeny. 2013. *To save everything, click here: the folly of technological solutionism*. First edition. New York: PublicAffairs.
Mothé, Daniel. 1994. « Le mythe du temps libéré ». *Esprit* 204(8-9):52-63.
Moyne, James, et Jimmy Iskandar. 2017. « Big Data Analytics for Smart Manufacturing: Case Studies in Semiconductor Manufacturing ». *Processes* 5(3):39. doi:10.3390/pr5030039.
Muhlmann, David. 2001. « Des nouvelles technologies à l'image des vieilles organisations ». *Sociologie du travail* 43(1):327-47.
Munn, Luke. 2023. « The Uselessness of AI Ethics ». *AI and Ethics* 3(3):869-77. doi:10.1007/s43681-022-00209-w.
Murray, Conor, et Molly Bohannon. 2025. « All The Major Companies And Orgs Dumping Their DEI Programs (Full List) ». *Forbes*, avril 11.
Nantermod, Philippe. 2018. « L'Amérique innove, la Chine copie, l'Europe réglemente ». *Le Temps*, juin 4.
Napoletani, Domenico, Marco Panza, et Daniele Struppa. 2011. « Agnostic Science. Towards a Philosophy of Data Analysis ». *Foundations of Science* 16(1):1-20. doi:10.1007/s10699-010-9186-7.
Narayanan, Arvind, et Sayash Kapoor. 2024. *AI Snake Oil. What Artificial Intelligence Can Do, What It Can't, and How to Tell the Difference*. Princeton Oxford: Princeton University Press.
Natale, Simone. 2019. « If Software Is Narrative: Joseph Weizenbaum, Artificial Intelligence and the Biographies of ELIZA ». *New Media & Society* 21(3):712-28. doi:10.1177/1461444818804980.
Naville, Pierre. 1956. *Essai sur la qualification du travail*. Paris: Marcel Rivière.
Nazareno, Luísa, et Daniel S. Schiff. 2021. « The Impact of Automation and Artificial Intelligence on Worker Well-Being ». *Technology in Society* 67:1-21. doi:10.1016/j.techsoc.2021.101679.

Nelson, Richard R., et Sidney G. Winter. 1982. *An Evolutionary Theory of Economic Change*. 3. print. Cambridge, Mass.: Belknap Pr. of Harvard Univ. Pr.
Neuville, Jean-Philippe. 1995. « L'organisation : une dialogique de l'ordre et du désordre. Le cas du «juste-à-temps» dans l'industrie automobile européenne ». *Sociologie du travail* 37(3):389-409. doi:10.3406/sotra.1995.2215.
NG. 2023. « Cette entreprise française vire 217 salariés pour les remplacer par une intelligence artificielle ». *Ouest-France.fr*, septembre 18.
Noble, David F. [1984] 2011. *Forces of Production. A Social History of Industrial Automation*. New Brunswick, N.J: Transaction Publishers.
Núñez-Regueiro, Fernando, et Pascal Bressoux. 2023. « Évaluer l'action éducative des lycées à travers les IVAL : quand le « bruit » s'immisce dans l'administration de la preuve: » *Revue française de sociologie* Vol. 63(2):257-82. doi:10.3917/rfs.632.0257.
Offenhuber, Dietmar. 2024. « Shapes and Frictions of Synthetic Data ». *Big Data & Society* 11(2):20539517241249390. doi:10.1177/20539517241249390.
Ogien, Ruwen, et Christine Tappolet. 2008. *Les concepts de l'éthique: faut-il être conséquentialiste ?* L'avocat du diable. Paris: Hermann.
Oiry, Ewan. 2005. « Qualification et compétence : deux sœurs jumelles ? » *Revue française de gestion* 31(158):13-34. doi:10.3166/rfg.158.13-34.
Oiry, Ewan, et Jérémy Vignal. 2016. « Peut-on manager un changement tout en le subissant ? Le cas des managers de proximité ». *Question(s) de management* 13(2):61-72. doi:10.3917/qdm.162.0061.
O'Neil, Lorena. 2023. « These Women Tried to Warn Us About AI ». *Rolling Stone*, août 12.
Orlikowski, Wanda J. 2000. « Using Technology and Constituting Structures: A Practice Lens for Studying Technology in Organizations ». *Organization Science* 11(4):404-28.
Orlikowski, Wanda J. 2002. « Knowing in Practice: Enacting a Collective Capability in Distributed Organizing ». *Organization Science* 13(3):249-73.
Orlikowski, Wanda J. 2007. « Sociomaterial Practices: Exploring Technology at Work ». *Organization Studies* 28(9):1435-48. doi:10.1177/0170840607081138.
Orlikowski, Wanda J., et Susan V. Scott. 2008. « Sociomateriality: Challenging the Separation of Technology, Work and Organization ». *The Academy of Management Annals* 2(1):433-74. doi:10.1080/19416520802211644.
Orr, Julian E. 1986. « Narratives at Work. Story Telling as Cooperative Diagnostic Activity ». P. 62-72 in *CSCW '86: Proceedings of the 1986 ACM conference on Computer-supported cooperative work*.
Orton, John Wilfred. 2009. *Semiconductors and the Information Revolution: Magic Crystals That Made IT Happen*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
Ouest-France. 2011. « MHS à Nantes : 48 salariés repris par Atmel, 52 licenciés ». *Ouest-France.fr*, janvier 26.
Pachidi, Stella, Hans Berends, Samer Faraj, et Marleen Huysman. 2021. « Make Way for the Algorithms: Symbolic Actions and Change in a Regime of Knowing ». *Organization Science* 32(1):18-41. doi:10.1287/orsc.2020.1377.
Padian, Kevin. 2018. « Narrative and "Anti-Narrative" in Science: How Scientists Tell Stories, and Don't ». *Integrative and Comparative Biology*. doi:10.1093/icb/icy038.
Pailot, Philippe. 2014. « Le deuil dans les sciences de l'organisation : éléments d'analyse critique d'un transfert conceptuel ». *Management international* 18(4):12-31. doi:10.7202/1026026ar.
Pardi, Tommaso. 2015. « La réalité et les impasses du système de production Toyota à la base du Lean ». in *Les risques du travail. Pistes critiques et pratiques*, édité par A. Thébaud-Mony, P. Davezies, L. Vogel, et S. Volkoff. La Découverte.

Pardoux, Éric, et Louis Devillaine. 2022. « Vers une éthique processuelle de l'IA ». in *Conférence Nationale en Intelligence Artificielle 2022 (CNIA 2022)*, *Actes CNIA 2022*. Saint-Etienne, France.
Parlement Européen. 2023. *Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre de mesures pour renforcer l'écosystème européen des semi-conducteurs*.
Parlement Européen. 2024. « Directive (UE) 2024/2831 du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2024 relative à l'amélioration des conditions de travail dans le cadre du travail via une plateforme (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) ».
Pasquinelli, Matteo. 2023. *The Eye of the Master: A Social History of Artificial Intelligence*. London New York: Verso.
Paulré, Bernard. 1997a. « L'industrie des semi-conducteurs en Europe : un redressement en vue ». in *L'industrie électronique européenne. Hétérogénéités et incertitudes*, édité par B. Paulré et Direction générale des stratégies industrielles France.
Paulré, Bernard, éd. 1997b. *L'industrie électronique européenne. Hétérogénéités et incertitudes*. Sessi.
Pégny, Maël, et Issam Ibnouhsein. 2018. « Quelle transparence pour les algorithmes d'apprentissage machine ? » *Revue d'intelligence artificielle* 32(4):447-78. doi:10.3166/ria.32.447-478.
Peneff, Jean. 1996. « Les débuts de l'observation participante ou les premiers sociologues en usine ». *Sociologie du travail* 38(1):25-44. doi:10.3406/sotra.1996.2240.
Pentier, Olivier. 2017. « e2v confirme sa reprise par le groupe américain Teledyne ». *Le Dauphiné libéré*, avril 18.
Peres, Ricardo Silva, Xiaodong Jia, Jay Lee, Keyi Sun, Armando Walter Colombo, et Jose Barata. 2020. « Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook ». *IEEE Access* 8:220121-39. doi:10.1109/ACCESS.2020.3042874.
Perez, Carlota, et Tamsin Murray Leach. 2022a. *Technological Revolutions: Which Ones, How Many, and Why It Matters: A Neo-Schumpeterian View*. Projet Beyond 4.0.
Perez, Carlota, et Tamsin Murray Leach. 2022b. *The Luddite Legacy: Why the Initial Diffusion of Technologies Does Not Predict the Future of Work*. Projet Beyond 4.0.
Perrow, Charles. 2011. *Normal Accidents: Living with High Risk Technologies - Updated Edition*. Princeton University Press.
Pesqueux, Yvon. 2011. « La responsabilité sociale de l'entreprise (RSE) comme discours ambigu ». *Innovations* n°34(1):37-55. doi:10.3917/inno.034.0037.
Petit, Sébastien. 2016. « La rationalisation du travail intellectuel : ethnographie de l'activité de conception industrielle ». These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE).
Petkauskas, Vilius. 2023. « Lessons Learned from ChatGPT's Samsung Leak ». *Cybernews*, mai 8.
Pfeiffer, Sabine. 2017. « The Vision of "Industrie 4.0" in the Making—a Case of Future Told, Tamed, and Traded ». *NanoEthics* 11(1):107-21. doi:10.1007/s11569-016-0280-3.
Pinch, Trevor, et Wiebe Bijker. 1984. « The Social Construction of Facts and Artefacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other ». *Social Studies of Science* 14:399-441.
Piquard, Alexandre. 2025. « IA : 45 entreprises européennes demandent une « pause » dans l'application de l'AI Act ». juillet 4.
Pistilli, Giada. 2024. « Pour une éthique de l'intelligence artificielle conversationnelle ». Discipline, Sorbonne Université.
Polanyi, Michael. 1967. *The Tacit Dimension*. Chicago: University of Chicago Press.
Ponce Del Castillo, Aída, et Simon Taes. 2025. « Artificial Intelligence and Labor Law ». P. 339-66 in *The Cambridge Handbook of the Law, Ethics and Policy of Artificial Intelligence*, édité par N. A. Smuha. Cambridge University Press.
Ponroy, Xavier. 2025. « "On n'aura plus de métier" : face à l'IA, des doubleurs de jeux vidéo refusent de poursuivre leur travail ». *France Info*, mars 6.
Prévost, Thibault. 2023. « Les journalistes rêvent-ils d'androïdes blancs? » *www.arretsurimages.net/*.

Prévost, Thibault. 2025. « Capture règlementaire : le sport favori du cartel de l'IA ». https://synthmedia.fr/2025/02/article/capture-reglementaire-ia/.
Proudfoot, Diane. 2011. « Anthropomorphism and AI: Turing's Much Misunderstood Imitation Game ». *Artificial Intelligence* 175(5-6):950-57. doi:10.1016/j.artint.2011.01.006.
Quéré, Louis. 2001. « Naturaliser le sens : une erreur de catégorie ? » *Revue du MAUSS* 17(1):275-92. doi:10.3917/rdm.017.0275.
Raley, Rita, et Jennifer Rhee. 2023. « Critical AI: A Field in Formation ». *American Literature* 95(2):185-204. doi:10.1215/00029831-10575021.
Rallet, Alain, et André Torre. 2001. « Proximité géographique ou proximité organisationnelle ? Une analyse spatiale des coopérations technologiques dans les réseaux localisés d'innovation ». *Économie appliquée* 54(1):147-71. doi:10.3406/ecoap.2001.1755.
Ravn, Louis. 2025. « The Fabrication of Synthetic Data Promises: Tracing Emerging Arenas of Expectations and Boundary Work ». *Big Data & Society* 12(1):20539517241307915. doi:10.1177/20539517241307915.
del Real Torres, Alejandro, Doru Stefan Andreiana, Álvaro Ojeda Roldán, Alfonso Hernández Bustos, et Luis Enrique Acevedo Galicia. 2022. « A Review of Deep Reinforcement Learning Approaches for Smart Manufacturing in Industry 4.0 and 5.0 Framework ». *Applied Sciences* 12(23):12377. doi:10.3390/app122312377.
Renard, Guy. 1963. « La découverte et le perfectionnement des transistors ». *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications* 16(4):323-58. doi:10.3406/rhs.1963.4468.
Rességuier, Anaïs, et Rowena Rodrigues. 2020. « *AI Ethics Should Not Remain Toothless!* A Call to Bring Back the Teeth of Ethics ». *Big Data & Society* 7(2):205395172094254. doi:10.1177/2053951720942541.
Reverdy, Thomas. 2021. *Antimanuel de management de projet. Composer avec les incertitudes*. Malakoff: Dunod.
Reynaud, Jean-Daniel. 1988. « Les régulations dans les organisations. Régulation de contrôle et régulation autonome ». *Revue Française de Sociologie* 29(1):5. doi:10.2307/3321884.
Ribeyre, Dorothée. 1997. « Les alliances stratégiques des leaders européens de semi-conducteurs de 1989 au début de l'année 1996 ». in *L'industrie électronique européenne. Hétérogénéités et incertitudes*, édité par B. Paulré et Direction générale des stratégies industrielles France.
Rifkin, Jeremy, Françoise Chemla, et Paul Chemla. 2012. *La troisième révolution industrielle: comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*. Paris: LLL, les Liens qui libèrent.
Rip, Arie, et René Kemp. 1998. « Technological Change ». P. 327-99 in *Human choice and climate change: Vol. II, Resources and Technology*. Battelle Press.
Ritzer, George, et Nathan Jurgenson. 2010. « Production, Consumption, Prosumption: The Nature of Capitalism in the Age of the Digital 'Prosumer' ». *Journal of Consumer Culture* 10(1):13-36. doi:10.1177/1469540509354673.
Robert, Anne-Marie. 2010. « La post-édition : l'avenir incontournable du traducteur ? » *Traduire. Revue française de la traduction* (222):137-44. doi:10.4000/traduire.460.
Robert, Pascal. 2004. « Critique de la dématérialisation ». *Communication et langages* 140(1):55-68. doi:10.3406/colan.2004.3268.
Roby, Catherine. 2014. « Place et fonction des SHS dans les Écoles d'ingénieurs en France : état des lieux, enjeux et perspectives épistémiques ». phdthesis, Université Rennes 2.
Roethlisberger, Fritz Jules, et William J. Dickson, éd. 2003. *Management and the Worker*. The Early Sociology of Management and Organizations. London: Routledge.
Rogers, Everett M. [1962] 1995. *Diffusion of Innovations*. 4th ed. New York: Free Press.
Romele, Alberto, et Marta Severo. 2023. « Que veulent les images de l'IA ?: Une exploration de la communication scientifique visuelle de l'intelligence artificielle ». *Sociétés & Représentations* N° 55(1):179-201. doi:10.3917/sr.055.0179.

Rose, Frank. 1985. *Into the heart of the mind: an American quest for artificial intelligence*. 1st Vintage Books ed. New York: Vintage Books.
Rosenblatt, F. 1958. « The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. » *Psychological Review* 65(6):386-408. doi:10.1037/h0042519.
Rosental, Claude. 2009. « Anthropologie de la démonstration ». *Revue d'anthropologie des connaissances* 3(2). doi:10.3917/rac.007.0233.
Rosental, Claude. 2011. « De la démo-cratie. Mener l'Europe à l'aide de démonstrations publiques ». in *Humains, non-humains. Comment repeupler les sciences sociales*. Paris: la Découverte.
Rot, Gwenaële. 1998. « Autocontrôle, traçabilité, responsabilité ». *Sociologie du Travail* 40(1):5-20.
Rot, Gwenaële. 2000. « La résistance ouvrière face aux nouvelles formes de rationalisation ». *Travail, Emploi, Formation* 2(1):13-29.
Rot, Gwenaële. 2002. « Fluidité industrielle, fragilité organisationnelle ». *Revue française de sociologie* 43(4):711-37.
Rot, Gwenaële. 2014. « Noter pour ajuster. Le travail de la scripte sur un plateau de tournage ». *Sociologie du travail* 56(1):16-39. doi:10.4000/sdt.4749.
Rot, Gwenaële, et François Vatin. 2017. *Au fil du flux: le travail de surveillance-contrôle dans les industries chimique et nucléaire*. Collection Sciences sociales. Paris: Presses des Mines-Transvalor.
Roussilhe, Gauthier. 2025. « How to Use Computing Power Faster: On the Weird Economics of Semiconductors and GenAI ». https://gauthierroussilhe.com/en/articles/how-to-use-computing-power-faster.
Roy, Donald. 1954. « Efficiency and "The Fix": Informal Intergroup Relations in a Piecework Machine Shop ». *American Journal of Sociology* 60(3):255-66.
Ruault, Margot. 2025. « Travailleurs remplacés par l'IA : Klarna fait marche arrière et recrute à nouveau des humains ». https://www.latribune.fr/technos-medias/informatique/travailleurs-remplaces-par-l-ia-klarna-fait-marche-arriere-et-recrute-a-nouveau-des-humains-1024806.html?id=31021471403878.
Rudin, Cynthia, Chaofan Chen, Zhi Chen, Haiyang Huang, Lesia Semenova, et Chudi Zhong. 2021. « Interpretable Machine Learning: Fundamental Principles and 10 Grand Challenges ». *arXiv:2103.11251 [Cs, Stat]*. http://arxiv.org/abs/2103.11251.
Rugraff, Eric. 2019. « La politique industrielle de l'UE face à son décrochage technologique ». *Bulletin de l'Observatoire des politiques économiques en Europe,* 41(5):33-45.
Rumelhart, David E., Geoffrey E. Hinton, et Ronald J. Williams. 1986. « Learning Representations by Back-Propagating Errors ». *Nature* 323(6088):533-36. doi:10.1038/323533a0.
Rüttimann, Bruno G., et Martin T. Stöckli. 2016. « Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems ». *Journal of Service Science and Management* 9(6):485-500. doi:10.4236/jssm.2016.96051.
Salesforce. 2023. « More than Half of Generative AI Adopters Use Unapproved Tools at Work ». https://www.salesforce.com/news/stories/ai-at-work-research/.
Saraceno, Marco. 2024. « De l'usine intégrée au Jumeau Numérique : socio-histoire des prospectives françaises de l'industrie du futur (1980-2020) ». *Sociologie du travail* 66(4). doi:10.4000/12zii.
Savul, Güven. 2020. « The Logic of Technological Progress under Capitalism in the Context of Industry 4.0 ». *Journal of Labor and Society* 23(4):433-60. doi:10.1111/wusa.12481.
Schaffer, Simon. 1994. « Babbage's Intelligence: Calculating Engines and the Factory System ». *Critical Inquiry* 21(1):203-27. doi:10.1086/448746.
Schiffer, Zoë, et Casey Newton. 2023. « Yes, Elon Musk Created a Special System for Showing You All His Tweets First ». *Platformer*, février 15.
Schiølin, Kasper. 2020. « Revolutionary Dreams: Future Essentialism and the Sociotechnical Imaginary of the Fourth Industrial Revolution in Denmark ». *Social Studies of Science* 50(4):542-66. doi:10.1177/0306312719867768.

Schmitt, Églantine. 2016. « Des humains dans la machine : la conception d'un algorithme de classification sémantique au prisme du concept d'objectivité: » *Sciences du Design* 4(2):83-97. doi:10.3917/sdd.004.0083.
Schmitz, Joseph, et Janet Fulk. 1991. « Organizational Colleagues, Media Richness, and Electronic Mail: A Test of the Social Influence Model of Technology Use ». *Communication Research* 18(4):487-523. doi:10.1177/009365091018004003.
Schöneich, Svenja. 2021. « 'On a Hot Day in the Field...' The Art of Writing Ethnographic Vignettes ». *Ethnoscripts* 23(1):116-24.
Schröer, Christoph, Felix Kruse, et Jorge Marx Gómez. 2021. « A Systematic Literature Review on Applying CRISP-DM Process Model ». *Procedia Computer Science* 181:526-34. doi:10.1016/j.procs.2021.01.199.
Schumpeter, Joseph Alois. 1942. *Capitalism, Socialism and Democracy*. Harpers and Brothers.
Schwab, Klaus. [2016] 2017. *La quatrième révolution industrielle*. Malakoff: Dunod.
Se, Ksenia. 2024. « How ImageNet, AlexNet and GPUs Changed AI Forever ». https://www.turingpost.com/p/cvhistory6.
Seaver, Nick. 2017. « Algorithms as Culture: Some Tactics for the Ethnography of Algorithmic Systems ». *Big Data & Society* 4(2):1-12. doi:10.1177/2053951717738104.
Seaver, Nick. 2019. « Knowing Algorithms ». P. 412-22 in *DigitalSTS: a field guide for science & technology studies*, édité par J. Vertesi et D. Ribes. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
Seewald, Alexander K. 2022. « A Criticism of the Technological Singularity ». P. 91-119 in *Disruptive Technologies in Media, Arts and Design*. Vol. 382, *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham: Springer International Publishing.
Segrestin, Denis. 2004. *Les chantiers du manager*. Sociétales. Paris: Colin.
Segrestin, Denis, Jean-Louis Darréon, et Pascale Trompette, éd. 2004. « Le mythe de l'organisation intégrée. Les progiciels de gestion ». *Sciences de la société* (61).
Sennett, Richard. 2013. *Ensemble. Pour une éthique de la coopération*. Paris: Albin Michel.
Sewell, Graham. 1998. « The Discipline of Teams: The Control of Team-Based Industrial Work Through Electronic and Peer Surveillance ». *Administrative Science Quarterly* 43(2):397. doi:10.2307/2393857.
Shattuck, Thomas J. 2021. « Stuck in the Middle: Taiwan's Semiconductor Industry, the U.S.-China Tech Fight, and Cross-Strait Stability ». *Orbis* 65(1):101-17. doi:10.1016/j.orbis.2020.11.005.
Shead, Sam. 2018. « "NIPS" AI Conference Changes Name, Kind Of ». *Forbes*, novembre 21.
Shearer, Colin. 2000. « The CRISP-DM Model: The New Blueprint for Data Mining ». 5(4):13-22.
Shestakofsky, Benjamin. 2024. *Behind the Startup: How Venture Capital Shapes Work, Innovation, and Inequality*. Oakland, California: University of California Press.
Shrivastava, Rashi. 2024. « Dozens Of KFC, Taco Bell And Dairy Queen Franchises Are Using AI To Track Workers ». *Forbes*, février.
SIES. 2023a. *Évolutions de l'insertion professionnelle et des conditions d'emploi des diplômés de master (hors enseignement) durant la crise sanitaire*. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2023-12/ni-sies-2023-07-30486.pdf.
SIES. 2023b. *L'insertion professionnelle à 18 et 30 mois des diplômés 2020 de D.U.T*. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2023-12/nf-sies-2023-29-30588.pdf.
Simakova, Elena. 2010. « RFID 'Theatre of the Proof': Product Launch and Technology Demonstration as Corporate Practices ». *Social Studies of Science* 40(4):549-76. doi:10.1177/0306312710365587.
Simon, Herbert A. 1955. « A Behavioral Model of Rational Choice ». *The Quarterly Journal of Economics* 69(1):99. doi:10.2307/1884852.

Simon, Herbert A. 1982. *Models of bounded rationality*. Cambridge, Mass: MIT Press.
Singla, Alex, Alexander Sukharev, Lareina Yee, Michael Chui, et Bryce Hall. 2024. *State of AI in early 2024*. McKinsey. https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai#/.
Smith, Adam. [1776] 2022. *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*. Rééd. édité par D. Diatkine. GF. Paris: Flammarion.
Snow, David A., E. Burke Rochford, Steven K. Worden, et Robert D. Benford. 1986. « Frame Alignment Processes, Micromobilization, and Movement Participation ». *American Sociological Review* 51(4):464. doi:10.2307/2095581.
Société Française des Traducteurs. 2024. « Prise de position de la SFT sur l'intelligence artificielle : l'humain doit rester au cœur de la technologie ». https://www.sft.fr/fr/news/prise-de-position-de-la-sft-sur-l-intelligence-artificielle-l-humain-doit-rester-au-coeur-de-la-technologie-28.
Sommet pour l'action sur l'IA. 2025. « Bilan du Sommet ».
Soulé, Bastien. 2008. « Observation participante ou participation observante ? Usages et justifications de la notion de participation observante en sciences sociales ». *Recherches qualitatives* 27(1):127-40. doi:10.7202/1085359ar.
Sovacool, Benjamin K., et M. V. Ramana. 2015. « Back to the Future: Small Modular Reactors, Nuclear Fantasies, and Symbolic Convergence ». *Science, Technology, & Human Values* 40(1):96-125. doi:10.1177/0162243914542350.
Splunk. 2019. *The State of Dark Data*. San Francisco.
Star, Susan Leigh. 1999. « The Ethnography of Infrastructure ». *American Behavioral Scientist* 43(3):377-91.
Star, Susan Leigh, et James R. Griesemer. 1989. « Institutional Ecology, `Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39 ». *Social Studies of Science* 19(3):387-420. doi:10.1177/030631289019003001.
Steinert, Martin, et Larry Leifer. 2010. « Scrutinizing Gartner's Hype Cycle Approach ». P. 1-13 in *PICMET 2010 Technology Management for Global Economic Growth*. Thaïlande.
Steinhoff, James. 2024. « AI Ethics as Subordinated Innovation Network ». *AI & SOCIETY* 39(4):1995-2007. doi:10.1007/s00146-023-01658-5.
Stéphan, Juliette, Marc-Éric Bobillier-Chaumon, et Corinne Gaudart. 2022. « Reconnaissance et sens du travail à distance. Le cas d'enseignants d'une école d'ingénieur pendant le confinement ». *Le Journal des psychologues* 399(7):26-32. doi:10.3917/jdp.399.0026.
Strauss, Anselm. 1985. « Work and the Division of Labor ». *The Sociological Quarterly* 26(1):1-19. doi:10.1111/j.1533-8525.1985.tb00212.x.
Stroud, Dean, et Martin Weinel. 2020. « A safer, faster, leaner workplace? Technical maintenance worker perspectives on digital drone technology 'effects' in the European steel industry ». *New Technology, Work and Employment* 35(3):297-313.
Suchman, Lucy. 2006. *Human-Machine Reconfigurations: Plans and Situated Actions*. 2nd edition. Learning in Doing: Social, Cognitive and Computational Perspectives. Cambridge New York: Cambridge University Press.
Suchman, Lucy. 2021. « Six Unexamined Premises Regarding Artificial Intelligence and National Security ». https://ainowinstitute.org/publications/six-unexamined-premises-regarding-artificial-intelligence-and-national-security.
Suchman, Lucy. 2023. « The Uncontroversial 'Thingness' of AI ». *Big Data & Society* 10(2):20539517231206794. doi:10.1177/20539517231206794.
Swoboda, Torben, Risto Uuk, Lode Lauwaert, Andrew Peter Rebera, Ann-Katrien Oimann, Bartlomiej Chomanski, et Carina Prunkl. 2025. « Examining Popular Arguments Against AI Existential Risk: A Philosophical Analysis ».
Tao, Fei, Qinglin Qi, Ang Liu, et Andrew Kusiak. 2018. « Data-driven smart manufacturing ». *Journal of Manufacturing Systems* 48:157-69. doi:10.1016/j.jmsy.2018.01.006.

Tassinari, Carlo Andrea, Sara De Martino, et Yann Ferguson. 2024. « Moraliser les machines communicantes. Des barricades morales à l'éthique située : trois cas d'usage de l'IA en milieu professionnel ». *Communiquer. Revue de communication sociale et publique* (39). doi:10.4000/12zln.
Teixeira, Josélia Elvira, et Ana Teresa C. P. Tavares-Lehmann. 2022. « Industry 4.0 in the European union: Policies and national strategies ». *Technological Forecasting and Social Change* 180:121664. doi:10.1016/j.techfore.2022.121664.
de Terssac, Gilbert, et Benjamin Coriat. 1984. « Micro-électronique et travail ouvrier dans les industries de process ». *Sociologie du travail* 26(4):384-97. doi:10.3406/sotra.1984.1966.
de Terssac, Gilbert, Jean-Luc Soubie, et Jean-Pierre Neveu. 1988. « Systèmes experts et transferts d'expertise ». *Sociologie du travail* 30(3):461-77. doi:10.3406/sotra.1988.2418.
Thievenaz, Joris. 2014. « L'intérêt de la notion d'« enquête » pour l'analyse du travail en lien avec la formation ». *Travail et Apprentissages* 13(1):14-33. doi:10.3917/ta.013.0014.
Thomas, Marc. 2012. *Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines*. Québec: École de technologie supérieure : Presses de l'Université du Québec.
Thomas, Rachel L., et David Uminsky. 2022. « Reliance on Metrics Is a Fundamental Challenge for AI ». *Patterns* 3(5):100476. doi:10.1016/j.patter.2022.100476.
Tortorella, Guilherme Luz, Tarcisio A. Saurin, Peter Hines, Jiju Antony, et Daniel Samson. 2023. « Myths and Facts of Industry 4.0 ». *International Journal of Production Economics* 255:108660. doi:10.1016/j.ijpe.2022.108660.
Trabucchi, Daniel, et Tommaso Buganza. 2019. « Data-Driven Innovation: Switching the Perspective on Big Data ». *European Journal of Innovation Management* 22(1):23-40. doi:10.1108/EJIM-01-2018-0017.
Trauth-Goik, Alexander. 2021. « Repudiating the Fourth Industrial Revolution Discourse: A New Episteme of Technological Progress ». *World Futures* 77(1):55-78. doi:10.1080/02604027.2020.1788357.
Trist, E. L., et K. W. Bamforth. 1951. « Some Social and Psychological Consequences of the Longwall Method of Coal-Getting. An Examination of the Psychological Situation and Defences of a Work Group in Relation to the Social Structure and Technological Content of the Work System ». *Human Relations* 4(1):3-38. doi:10.1177/001872675100400101.
Truong Ngoc, Jean-Michel. s. d. « Les cogniticiens existent, mais qui les a rencontrés ? » Consulté 9 avril 2025. https://www.jean-michel-truong.com/systemes_experts/page/introuvable.html#retour1.
Tual, Morgane. 2019. « L'intelligence artificielle, le grand malentendu ». *Le Monde*, novembre 13.
Tubaro, Paola, Antonio A. Casilli, Maxime Cornet, Clément Le Ludec, et Juana Torres Cierpe. 2025. « Where does AI come from? A global case study across Europe, Africa, and Latin America ». *New Political Economy* 1-14. doi:10.1080/13563467.2025.2462137.
Tubaro, Paola, Antonio A. Casilli, et Marion Coville. 2020. « The Trainer, the Verifier, the Imitator: Three Ways in Which Human Platform Workers Support Artificial Intelligence ». *Big Data & Society* 7(1):1-12. doi:10.1177/2053951720919776.
Tully, Stephanie, Chiara Longoni, et Gil Appel. 2025. « Lower Artificial Intelligence Literacy Predicts Greater AI Receptivity ». *Journal of Marketing* ??? doi:10.1177/00222429251314491.
Turing, Alan. 1950. « Computing Machinery and Intelligence ». *Mind* 59:433-46O.
Ughetto, Pascal. 2004. « La rationalisation vue de l'activité de travail. Une diversification du traitement sociologique de l'autonomie et de la contrainte ». *Revue de l'IRES* 44(1):189-202.
Ughetto, Pascal. 2018a. *Les nouvelles sociologies du travail: introduction à la sociologie de l'activité*. Ouvertures sociologiques. Louvain-la-Neuve: De Boeck supérieur.
Ughetto, Pascal. 2018b. *Organiser l'autonomie au travail: travail collaboratif, entreprise libérée, mode agile... l'activité à l'ère de l'auto-organisation*. Entreprendre. Limoges: FYP éditions.
Union Européenne. 2024. *Règlement sur l'intelligence artificielle*.

Valdivia, Ana. 2024. « The supply chain capitalism of AI: a call to (re)think algorithmic harms and resistance through environmental lens ». *Information, Communication & Society* 0(0):1-17. doi:10.1080/1369118X.2024.2420021.
Van Campenhoudt, Luc, et Raymond Quivy. 2011. « Manuel de recherche en sciences sociales ».
Van Dijck, Jose. 2014. « Datafication, Dataism and Dataveillance: Big Data between Scientific Paradigm and Ideology ». *Surveillance & Society* 12(2):197-208. doi:10.24908/ss.v12i2.4776.
Van Giffen, Benjamin, Dennis Herhausen, et Tobias Fahse. 2022. « Overcoming the Pitfalls and Perils of Algorithms: A Classification of Machine Learning Biases and Mitigation Methods ». *Journal of Business Research* 144:93-106. doi:10.1016/j.jbusres.2022.01.076.
Van Horn, Grant, Oisin Mac Aodha, Yang Song, Yin Cui, Chen Sun, Alex Shepard, Hartwig Adam, Pietro Perona, et Serge Belongie. 2018. « The iNaturalist Species Classification and Detection Dataset ». in *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City, UT: IEEE.
Van Oort, Madison. 2019. « The Emotional Labor of Surveillance: Digital Control in Fast Fashion Retail ». *Critical Sociology* 45(7-8):1167-79. doi:10.1177/0896920518778087.
Vassal, Olivier. 2006. « Crise du sens, défis du management ». *L'Expansion Management Review* 121(2):67-73. doi:10.3917/emr.121.0067.
Vaswani, Ashish, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Ł. ukasz Kaiser, et Illia Polosukhin. 2017. « Attention is All you Need ». in *Advances in Neural Information Processing Systems*. Vol. 30. Curran Associates, Inc.
de Vaujany, François-Xavier. 2006. « Pour une théorie de l'appropriation des outils de gestion : vers un dépassement de l'opposition conception-usage: » *Management & Avenir* n° 9(3):109-26. doi:10.3917/mav.009.0109.
Vayre, Jean-Sébastien. 2018. « Comment décrire les technologies d'apprentissage artificiel ? Le cas des machines à prédire ». *Réseaux* 211(5):69-104. doi:10.3917/res.211.0069.
Vayre, Jean-Sébastien, et Gérald Gaglio. 2021. « L'intelligence artificielle n'existe-t-elle vraiment pas ? Quelques éléments de clarification autour d'une science controversée ». *Diogène* 269-270(1):107-20. doi:10.3917/dio.269.0107.
Vayre, Jean-Sébastien, et Judith Igelsböck. 2021. « La technologie au service de la démocratie au travail ? Le cas des Whiteboards. » *La Nouvelle Revue du Travail* (18):1-19. doi:10.4000/nrt.8773.
Velkovska, Julia, et Marc Relieu. 2021. « Pour une conception « située » de l'intelligence artificielle: Des interactions hybrides aux configurations socio-techniques ». *Réseaux* N° 229(5):215-29. doi:10.3917/res.229.0215.
Vendrell-Herrero, Ferran, et Oscar F. Bustinza. 2020. « Servitization in Europe ». in *Industry 4.0 and Regional Transformation*, édité par L. De Propris et D. Bailey. New York: Routledge.
Verbeek, Peter-Paul. 2016. « Toward a Theory of Technological Mediation: A Program for Postphenomenological Research ». P. 189-204 in *Technoscience and postphenomenology: the Manhattan papers*, *Postphenomenology and the philosophy of technology*, édité par J. K. B. O. Friis et R. P. Crease. Lanham: Lexington Books.
Vereycken, Yennef, Monique Ramioul, et Maarten Hermans. 2021. « Old Wine in New Bottles? Revisiting Employee Participation in Industry 4.0 ». *New Technology, Work and Employment* 36(1):44-73. doi:10.1111/ntwe.12176.
Verley, Patrick. 1997. *La révolution industrielle*. Folio. Paris: Gallimard.
Vigny, Jean-Benoît. 2023. « Isère. Ces composants électroniques grenoblois que l'on trouve dans les armes russes ». *Le Dauphiné libéré*, mai 12.
Villani, Cédric, Marc Schoenauer, Yann Bonnet, Charly Berthet, François Levin, Bertrand Rondepierre, et Stella Biabiany-Rosier. 2018. *Donner un sens à l'intelligence artificielle. Pour une stratégie nationale et européenne*. *Mission parlementaire*. Gouvernement français. https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/184000159.pdf.

Villard, Aurélie. 2012. « Développement de méthodologies d'Eco-conception pour le secteur microélectronique ». Génie industriel, Université de Grenoble.
Vinck, Dominique. 1995. *Sociologie des sciences*. Paris: A. Colin.
Vinck, Dominique. 2005. « Ethnographie d'un laboratoire de recherche technologique: analyse de la médiation entre recherche publique et appropriation privée ». *Sciences de la société : Les cahiers du LERASS* (66):73-91. https://hal.science/hal-00261040.
Viniacourt, Elise. 2023. « Intelligence artificielle : Geoffrey Hinton, un des pères de la technologie, sonne l'alerte ». *Libération*, mai 2.
Vinsel, Lee. 2021. « You're Doing It Wrong: Notes on Criticism and Technology Hype ». https://sts-news.medium.com/youre-doing-it-wrong-notes-on-criticism-and-technology-hype-18b08b4307e5.
Vogrin, Michael. 2022. « Why Technological Determinism Is Still Alive, and Why We Should Let It Rest in Peace ». *Off Campus: Seggau School of Thought* 8:175-90. doi:10.25364/25.8:2022.12.
de Vries, Katja. 2020. « You never fake alone. Creative AI in action ». *Information, Communication & Society* 23(14):2110-27. doi:10.1080/1369118X.2020.1754877.
Vuarin, Louis, et Véronique Steyer. 2023. « Le principe d'explicabilité de l'IA et son application dans les organisations ». *Réseaux* 240(4):179-210. doi:10.3917/res.240.0179.
Vuarin, Louis, et Véronique Steyer. 2025. « La résilience organisationnelle face à l'intelligence artificielle : Examen critique du concept de human in the loop en action ». *Innovations* 76(1):239-76. doi:10.3917/inno.pr2.0183.
de Vynck, Gerrit. 2023. « Why Nvidia Is Suddenly One of the Most Valuable Companies in the World ». *The Washington Post*, mai 26.
Wahlster, Wolfgang. 2021. « Ten Years of Industrie 4.0 ».
Wang, Yi, Hai-Shu Ma, Jing-Hui Yang, et Ke-Sheng Wang. 2017. « Industry 4.0: A Way from Mass Customization to Mass Personalization Production ». *Advances in Manufacturing* 5(4):311-20. doi:10.1007/s40436-017-0204-7.
Waschneck, Bernd, Thomas Altenmüller, Thomas Bauernhansl, et Andreas Kyek. 2016. « Production Scheduling in Complex Job Shops from an Industrie 4.0 Perspective: A Review and Challenges in the Semiconductor Industry ». in *SamI40 workshop at i-KNOW*. Graz, Autriche.
Waters, Richard. 2014. « Artificial intelligence: machine v man ». *Financial Times*, octobre 31.
Weick, Karl E., et Karlene H. Roberts. 1993. « Collective Mind in Organizations: Heedful Interrelating on Flight Decks ». *Administrative Science Quarterly* 38(3):357. doi:10.2307/2393372.
Weick, Karl E., Kathleen M. Sutcliffe, et David Obstfeld. 2005. « Organizing and the Process of Sensemaking ». *Organization Science* 16(4):409-21.
Weiss-Blatt, Nirit. 2023. « AI Panic ». https://www.aipanic.news/.
Whyte, William. 2001. *Cleanroom Technology. Fundamentals of Design, Testing and Operation*. John Wiley & Sons.
Wiener, Norbert. [1948] 2014. *Cybernétique et société: l'usage humain des êtres humains*. édité par R. Le Roux.
Williams, Robin, et Neil Pollock. 2012. « Research Commentary — Moving Beyond the Single Site Implementation Study: How (and Why) We Should Study the Biography of Packaged Enterprise Solutions ». *Information Systems Research* 23(1):1-22. doi:10.1287/isre.1110.0352.
Wilson, H. James, Paul R. Daugherty, et Nicola Morini-Bianzino. 2017. « The Jobs That Artificial Intelligence Will Create ». *MIT Sloan Management Review*, 97-104.
Winkel, Marek. 2024. « Controlling the Uncontrollable: The Public Discourse on Artificial Intelligence between the Positions of Social and Technological Determinism ». *AI & SOCIETY*. doi:10.1007/s00146-024-01979-z.
Winner, Langdon. 1980. « Do Artifacts Have Politics? » *Daedalus* 121-36.
Winner, Langdon. 1998. « Prophets of Inevitability ». *MIT Technology Review*.

Wirth, Assia, Clément Le Ludec, Camille Girard-Chanudet, et Maxime Cornet. 2025. « Who Decides When Artificial Intelligence Works? Algorithmic Production as a Continuous Evaluation Process ». *Digital Society* 4(3):65. doi:10.1007/s44206-025-00224-4.
Wong, Saw Bin, et Stanley Richardson. 2010. « Assessment of Working Conditions in Two Different Semiconductor Manufacturing Lines: Effective Ergonomics Interventions ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 20(5):391-407. doi:10.1002/hfm.20189.
Woodhouse, Iain H. 2021. « On 'Ground' Truth and Why We Should Abandon the Term ». *Journal of Applied Remote Sensing* 15(4):1-14. doi:10.1117/1.JRS.15.041501.
Wyatt, Sally. 2008. « Technological Determinism Is Dead; Long Live Technological Determinism ». in *The Handbook of Science and Technology Studies*, édité par E. J. Hackett, O. Amsterdamska, M. Lynch, et J. Wacjman. Cambridge, Mass: MIT Press.
Zdenek, Sean. 2003. « Artificial Intelligence as a Discursive Practice: The Case of Embodied Software Agent Systems ». *AI & SOCIETY* 17(3):340-63. doi:10.1007/s00146-003-0284-8.
Ziewitz, Malte. 2016. « Governing Algorithms: Myth, Mess, and Methods ». *Science, Technology, & Human Values* 41(1):3-16. doi:10.1177/0162243915608948.
Zolesio, Emmanuelle. 2011. « Anonymiser les enquêtés ». *¿ Interrogations ? Revue pluridisciplinaire de sciences humaines et sociales* (12):174. https://shs.hal.science/halshs-00739600.
Zuboff, Shoshana. 1988. *In the Age of the Smart Machine: The Future of Work and Power*. New York: Basic Books.

Annexes

1. Enquête ethnographique à SemiCorp

Année	Mois	Nombre de journées / demi-journées sur place	Remarques / Evénements notables
2022	Février	1	Prise de contact, phase préliminaire à l'enquête, pas ou peu de recueil de données empiriques.
	Mars	1	
	Avril	0	
	Mai	4	Début de la collecte de matériau le 23 mai 2022. Accueil d'une délégation d'EuroSite.
	Juin	2	Réunion de définition des contours de mon enquête avec ma direction de thèse et les enquêtés de l'équipe IA.
	Juillet	3	Départ de Claude.
	Août	1	RAS.
	Septembre	4	
	Octobre	1	
	Novembre	2	Création d'un document de traçage de la catégorisation du ClassifiMotif. Enclenchement d'une phase de restructuration du dataset.
	Décembre	2	RAS.
2023	Janvier	5	La « réunion des spirales ».
	Février	6	Déploiement du ClassifiMotif sur une première machine (jusqu'ici : seulement en mode shadow, accessible aux ingénieurs de l'équipe IA uniquement). Première et deuxième journées en salle blanche.
	Mars	3	Réunion « Priorités et automatisation ». Immersion dans l'équipe Suivi Temps Réel. Réunions réunissant ingénieurs des bureaux et techniciens en salle (présentation du ClassifiMotif aux techniciens).
	Avril	2	Troisième journée en salle blanche.
	Mai	0	RAS.
	Juin	1	
	Juillet	0	Percevant l'arrivée à une forme de saturation des données empiriques dans le périmètre de l'enquête – et occupé par d'autres projets – je réduis ma présence sur le terrain. A noter : en juillet, nous avons rencontré Claude de façon informelle, qui a accepté de répondre à des questions qui subsistaient sur l'histoire du ClassifiMotif.
	Août		
	Septembre		
	Octobre	1	Echanges sur l'avancée du déploiement du ClassifiMotif pendant mon absence.
	Novembre	0	RAS.
	Décembre		
2024	Janvier		
	Février	1	Restitution à l'équipe IA (Régis, Jérôme, Etienne).
	Total	40	

Tableau 14 : Résumé chronologique du déroulé de l'enquête.

Date	Intitulé	Participants	Remarque	Durée
15/06/22	Réunion matinale quotidienne	Ingénieurs du service Qualité	Sur place mais en ligne	0h30
20/06/22				0h15
13/07/22				0h15
21/07/22				0h15
31/08/22				0h15
14/09/22				0h15
21/09/22				0h15
26/09/22				0h15
27/09/22				0h15
28/09/22				0h15
09/11/22				0h15
07/12/22				0h15
17/01/23				0h15
26/01/23				0h15
09/02/23				0h15
22/02/23				0h15
23/02/23				0h15
02/03/23				0h15
09/03/23				0h15
			Total	5h00

Tableau 15 : Réunions quotidiennes.

Date	Intitulé	Participants	Remarque	Durée
23/05/22	Formation ClassifiMotif avec EuroSite	Équipe IA, Délégation d'EuroSite, Service Informatique		3h00
24/05/22				5h00
25/05/22			Je suis en ligne	1h00
30/05/22	Développement ClassifiMotif et Interface (ci-après DCI)	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
15/06/22	Présentation du ClassifiMotif au service Photolithographie	Équipe IA, Service Informatique		1h00
15/06/22	DCI	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
20/06/22	Brainstorming d'identification des besoins d'automatisation	Équipe IA, Ingénieurs du service Qualité		1h30
13/07/22	DCI	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
20/07/22	DCI	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
21/07/22	Brainstorming d'identification des besoins d'automatisation	Équipe IA, Ingénieurs du service Qualité		1h30
14/09/22	Réunion hebdomadaire de l'équipe IA	Équipe IA		1h00
15/09/22	DCI	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
26/09/22	Retours déploiement ClassifiMotif	Équipe IA, Service Informatique	En ligne	0h30
27/09/22	Présentation du planning d'installation de nouvelles machines et de la stratégie IA dans le service Qualité	Équipe IA, Responsable machines, Techniciens qualité		1h30
15/12/22	Réunion trimestrielle de présentation de l'orientation du service Qualité	Directeur du service Qualité, Ingénieurs et managers du service Qualité		1h00
17/01/23	La « réunion des spirales »	Équipe IA, Manager de l'équipe Suivi Temps Réel, Responsables d'ateliers de production		1h30
17/01/23	Formation Tech. 2	Étienne (ingénieur-technicien, équipe IA) Techniciens qualité nouveaux arrivants		2h30
09/02/23	Réunion hebdomadaire de l'équipe IA	Équipe IA		2h00
10/02/23	Présentation du ClassifiMotif aux managers d'équipe de techniciens qualité	Jérôme, Managers d'équipe de techniciens qualité		0h30
02/03/23	Réunion trimestrielle du service Qualité	Ingénieurs du service Qualité, Techniciens qualité		2h00
09/03/23				2h00
10/03/23	Réunion « Priorités & Automatisation »	Directeur adjoint du service Qualité, Ingénieurs de chaque équipe du service		1h00
			Total	32h30

Tableau 16 : Réunions techniques, de présentation ou d'échange.

Lieu de travail	Équipe	Statut	Nom pseudonymisé	Temps d'échange total
Open space du service Qualité	IA	Manager de proximité	Régis	6h45
		Ingénieur	Claude	15h30
		Ingénieur-technicien	Étienne	2h45
		Ingénieur	Jérôme	14h00
		Alternant ingénieur	Arthur	1h30
	Suivi Temps Réel	Manager	Delphine	0h30
		Ingénieur	Daniel	2h00
	Amélioration Qualité	Ingénieure	Elodie	2h00
Salle blanche	Contrôle qualité (équipe de jour A)	Manager	Mathieu	0h15
		Technicien (Tech. 4)	Alfred	1h30
		Technicien (Tech. 3)	Antoine	8h00
		Technicienne (Tech. 4)	Cécile	2h00
		Technicienne (Tech. 4)	Déborah	1h00
		Technicienne (Tech. 3)	Julia	5h15
		Technicien (Tech. 3)	Stéphane	2h30

Tableau 17 : Sessions d'échanges avec les enquêtés (discussions libres, observation active du travail ; réunions exclues).

Dans le Tableau 17 ci-dessus je n'indique pas de total, il serait faussé par les rares occasions où les échanges ont réuni plusieurs enquêtés à la fois. Les décomptes de ce tableau incluent des temps informels, ou d'observation du travail avec un échange soutenu, et excluent donc les réunions du Tableau 16.

Date	Contenu	Durée
26/09/22	Repérage de bugs sur l'interface du ClassifiMotif.	1h00
27/09/22	Expérience de reclassification de résultats proposés par le ClassifiMotif.	1h30
8/11/22	Génération de fichiers KLARF pour préparer une base de données d'évaluation du ClassifiMotif.	3h30
7/12/22	Nettoyage de la base de données du ClassifiMotif – classe « tache ».	2h00
5/01/23	Nettoyage de la base de données du ClassifiMotif – classe « trait ».	2h00
25/01/23	Mise à jour de l'herbier du ClassifiMotif (document PowerPoint).	1h00
25/01/23	Proposition d'une définition pour les spirales.	0h30
26/01/23	Création d'un ensemble de test du ClassifiMotif à partir d'exemples réels.	1h00
	Total	12h30

Tableau 18 : Temps de travail en autonomie.

2. Enquête par entretiens à Mecanex

Statut de l'enquêté	Lieu	Date	Durée
Ingénieure Support sur site client	Mon domicile (visioconférence)	09/02/24	0h55
Responsable du projet Maintenance prédictive	Site de Mecanex	14/02/24	1h15
Responsable Innovation	Site de Mecanex	14/02/24	0h55
Directeur de l'innovation	Site de Mecanex (visioconférence)	15/02/24	0h55
Ingénieur Modélisation	Site de Mecanex	15/02/24	0h50
Ingénieur Logiciel	Site de Mecanex	15/02/24	1h10
Ingénieur Chimie	Site de Mecanex	15/02/24	1h20
Responsable Support client	Site de Mecanex	16/02/24	1h20
Responsable RH	Site de Mecanex	16/02/24	0h55
		Total	9h35

Tableau 19 : Résumé des entretiens réalisés à Mecanex.

Formulaire de consentement à l'enregistrement de l'entretien

Les informations recueillies vous concernant vont faire l'objet d'un traitement dans le cadre de la thèse menée par moi-même, Louis Devillaine, doctorant au laboratoire de sciences sociales Pacte. Cette thèse s'intitule « Usages de l'intelligence artificielle dans les systèmes techniques complexes : enjeux organisationnels, sociétaux, politiques et éthiques. »

Votre participation à cet entretien est entièrement libre et volontaire. Vous êtes libre de vous retirer ou de cesser votre participation à cet entretien à tout moment. Ce retrait n'aura aucune conséquence.

Je suis le seul destinataire des données que vous voudrez bien partager avec moi. Toutes les données seront conservées en France. Les résultats de cette recherche seront diffusés de façon anonyme dans des colloques professionnels et scientifiques, dans des rapports destinés au projet européen StorAIge, dans des revues professionnelles et académiques et dans des médias destinés au grand public.

Si vous acceptez l'enregistrement audio de votre entretien, merci de remplir les champs suivants et de signer en bas de la page.

Je soussigné(e), Mme/M. _____
autorise par la présente M. Louis DEVILLAINE à procéder à l'enregistrement audio de notre entretien.

Si vous le souhaitez, cet entretien peut être anonymisé. Dans ce cas, aucune information conservée ne pourra révéler votre identité : les notes d'entretien, comptes rendus d'entretien, notes d'observation, notes d'analyses et publications seront complètement anonymisés. Votre identité sera dissimulée à l'aide d'un numéro aléatoire dans tous les écrits produits sur la base de vos propos (comptes rendus d'entretien, notes d'observation, notes d'analyse échangées entre les chercheurs, publications…).

☐ **Je souhaite que l'entretien soit anonymisé.**

Vous pouvez poser des questions au sujet de ce projet à tout moment en communiquant avec le responsable du projet par courrier électronique : louis.devillaine@univ-grenoble-alpes.fr. Vous pouvez accéder et obtenir copie des données vous concernant, vous opposer au traitement de ces données, les faire rectifier ou les faire effacer. Vous disposez également d'un droit à la limitation du traitement de vos données.

Si vous estimez que vos droits Informatique et Libertés ne sont pas respectés, vous avez la possibilité d'introduire une réclamation en ligne auprès de la CNIL ou par courrier postal. CNIL, 3 Place de Fontenoy, TSA 80715 – 75334 Paris Cedex 07.

Fait le : **A :**

Signature

Figure 70 : Formulaire de consentement à l'enregistrement des entretiens.

Générique	*Trajectoire professionnelle*	Pouvez-vous me décrire votre parcours professionnel ? Quel est votre rôle au sein de l'entreprise ? En quoi consiste votre journée-type ? Avez-vous perçu des évolutions récentes dans votre métier ?
	Motivations et attentes	Quelles sont les motivations pour le déploiement de l'IA ? (*pousser la question le plus loin possible, faire préciser*) Pensez-vous que le déploiement des systèmes d'IA est une nécessité ? Les systèmes d'IA remplacent-ils – ou vont-ils remplacer – les salariés ? Et les salariés futurs ?
	Modalités du déploiement	Comment l'innovation technologique est-elle pilotée à Mecanex ? Comment les utilisateurs des technologies sont-ils intégrés au déploiement ? A partir de quel moment un système d'IA peut-il être déployé ?
	Évaluation des dispositifs d'IA	Qu'est-ce qui caractérise un bon système ? Comment sont évaluées les performances des systèmes d'IA ? Comment les enjeux de fiabilité influencent-ils la conception des systèmes ?
Spécifique	*RH*	Dans quelle mesure le déploiement d'outils d'IA affecte-t-il vos pratiques de travail ? Les compétences en développement de systèmes d'IA sont-elles prisées ? Êtes-vous encouragée à incorporer des outils d'IA dans vos pratiques de recrutement ?
	Relation client	Sur quels types de projets intervenez-vous ? Comment les clients participent-ils à l'élaboration des projets d'IA ? Dans quelle mesure le déploiement d'outils d'IA affecte-t-il l'organisation qui les installe ? Êtes-vous chargée de former les clients ? Si oui : qui formez-vous ? quels types de compétences sont-elles mises en jeu ? Si non : qui le fait ?
	Logiciel	Les programmes informatiques d'aujourd'hui sont-ils différents par rapport à ceux d'il y a 10 ans ? Pouvez-vous me décrire comment sont entraînés les systèmes d'IA ?

		Quelles données sont collectées ? Que permettent de mesurer les données ? Et que ne permettent-elles pas de mesurer ? Quel crédit accordez-vous aux données dont vous disposez ?

Tableau 20 : Guide d'entretien à Mecanex.

3. Contributions scientifiques réalisées au cours de la thèse

Publications

Dans des conférences à comité de lecture

- Benlaksira Seddik, Bonifas Chloé, Davat Ambre, **Devillaine Louis**, Durán Cárdenas Sofía Claudia, Tilly Marc, Ménissier Thierry, Pigeonnat Yvan, « **Prometheus Challenge: An Ethics Training for Engineering Students** », *European Society for Engineering Education (SEFI) conference*, Lausanne (Suisse), 2024. *https://hal.science/hal-04717700*
- Pardoux Éric, **Devillaine Louis**, « **Vers une éthique processuelle de l'IA** », *Conférence Nationale en Intelligence Artificielle,* Saint-Etienne, 2022. *https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/hal-03866133v1*

Dans des ouvrages collectifs

- Ménissier Thierry (éd.), *Vocabulaire critique de l'intelligence artificielle*, Hermann, 2025 (à venir).
  - Bonifas Chloé, Chauvière Léa, Davat Ambre, **Devillaine Louis**, entrée « Coûts ».
  - **Devillaine Louis**, entrée « Ground Truth ».
  - Pardoux Éric, **Devillaine Louis**, entrée « Idéologies ».
  - Reverdy Thomas, **Devillaine Louis**, entrée « Industrie ».
  - Bonifas Chloé, **Devillaine Louis**, entrée « Travail et post-work ».

Communications dans des séminaires et conférences nationales et internationales avec comité de lecture

- Communication « **Transfert ou reconstruction de savoirs ? Conception d'un système d'intelligence artificielle dans l'industrie high-tech** », colloque inter-congrès *Travail, emploi et organisations à l'ère du numérique* de l'Association Française de Sociologie, au CNAM, Paris, 21 mars 2025.
- Communication « **Data Scientists in the Industrial Context: between Expertise and Micro-tasking** », conférence internationale *INDL-6: Digital Labor in the Wake of Pandemic Times*, co-organisé par l'Organisation Mondiale du Travail, la Digital Platform Labor (DiPLab), et le Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB), Berlin, 10 octobre 2023.
- Communication « **Ground(ed) truth. Building a dataset in the industrial context** », conférence internationale *STS-CH2023: Science, Expertise and other Modes of Knowledge: Trends, Patterns, and Prospects*, organisée par la Swiss Association for the Studies of Science, Technology & Society (STS-CH), Bâle, 31 août 2023.
- Communication « **Dynamiques d'*enactment* de l'IA en contexte industriel** », journée d'étude internationale *Matérialités et représentations dans l'intelligence artificielle : l'IA au prisme des Sciences Humaines et Sociales*, organisée par Camille Girard-Chanudet et Lucie Conjard, EHESS, Paris, 14 octobre 2022.
- Avec Éric Pardoux, communication « **Towards processual ethics of AI** », séminaire interdisciplinaire international *Where AI Ethics Should Go?*, organisé par Maël Pégny et Anna Zielinska, Université de Tübingen, 30 juin 2022.
- Avec Roman Malo, communication « **Modélisation, prédiction, hyperréel : vers une construction normée de la réalité** », *3ème Journée d'Ethique de l'IA*, organisée par l'Observatoire international sur les impacts sociétaux de l'IA et du numérique (OBVIA), Université de Laval (Canada), 11 février 2022.

Communications sur invitation

- Présentation d'un chapitre de thèse « **Diffusion, propagation, et appropriation des promesses de l'IA dans l'industrie du semiconducteur** », séminaire doctoral de l'équipe Régulations du laboratoire Pacte, organisé par Jean-Baptiste Devaux et Maëva Leulier-Blanchard, 13 décembre 2024.
- Présentation « **Irruption de l'éthique dans le déploiement de l'IA dans l'industrie** », workshop de lancement du projet ETHICS 4.0, Grenoble, 25 juin 2024.
- Présentation « **Expertise et (di)gestion de la connaissance dans la conception de l'intelligence artificielle dans l'industrie** », séminaire *La tech et "l'entreprise de morale" : pratiques et discours éthiques dans l'industrie numérique*, organisé par Rémi Rouge, Univ. Catholique de Lille, 11 juin 2024.
- Présentation « **Intelligence artificielle, industrie & travail** », séminaire de l'équipe DOME2S, Génie Industriel, Grenoble, 20 octobre 2023.
- Poster « **Concevoir un système d'intelligence artificielle dans le contexte industriel** », colloque *Les transformations du travail par l'IA,* organisé par le LaborIA, Paris, 26 septembre 2023. *https://hal.univ-grenoble-alpes.fr/halshs-04480739v1*
- Présentation « **Dynamiques d'*enactment* de l'IA en contexte industriel** », séminaire d'équipe Régulations du laboratoire Pacte, organisé par Séverine Louvel, Grenoble, 7 octobre 2022.
- Conférence « **Explaining or Approximating? Ethical issues of Explainable ML for Critical Systems** », école d'été *Role and effects of ARTificial Intelligence in Secure ApplicatioNs* (ARTISAN 2022) organisée par Oum-El-Kheir Aktouf, Andrea Ceccarelli, et Oliver Jung, Valence, 7 juillet 2022.

Diffusion de la recherche hors du monde académique

- Avec Chloé Bonifas, séance (4/6) **« IA et travail : transformation radicale ou évolution sans surprise ?** », dans le cadre du cours public *La société au défi de l'IA* organisé par la Société alpine de philosophie à la Bibliothèque municipale de Grenoble, 13 mai 2025.
- Intervention à l'école Polytechnique « **Making "good" AI. An overview of different ways of thinking ethically about AI** », invitation par Véronique Steyer dans le cadre du MScT Artificial Intelligence & Advanced Visual Computing, Saclay, 5 novembre 2024.
- Intervention et débat auprès d'organisations syndicales « **Les lignes rouges de l'IA : le point de vue de l'éthique** », deuxième journée d'étude *Intelligence artificielle et travail. Quels enjeux pour les travailleurs et les travailleuses ?* organisée par l'association Le Fil Rouge et l'Institut d'Etudes Sociales en partenariat avec des organisations syndicales, Grenoble, 17 octobre 2024.
- Présentation auprès d'organisations syndicales « **Que dit la recherche en SHS sur l'IA et le travail** ? » d'une synthèse du colloque « Intelligence artificielle et transformations du travail » (originellement rédigée par Thomas Reverdy), première journée d'étude *Intelligence artificielle et travail. Quels enjeux pour les travailleurs et les travailleuses ?* organisée par l'association Le Fil Rouge et l'Institut d'Etudes Sociales en partenariat avec des organisations syndicales, Grenoble, 26 janvier 2024.
- Interventions dans une école d'ingénieur **« Introduction à la sociologie des transformations numériques et à l'éthique dans les sciences des données et de l'information** », auprès des étudiants 2A SICOM de Phelma (Grenoble INP), aux printemps 2022, 2023 et 2024.
- Conférence pédagogique dans un lycée « **Intelligence artificielle, décortication d'une technologie** », au lycée polyvalent La Saulaie de Saint-Marcellin, 2 décembre 2022.

- Présentation dans une école d'ingénieur « **Intelligence artificielle en contexte industriel, digestion de connaissances dans la construction d'une base de données** », cours d'*Industrialisation digitale durable* dispensé par Céline Cholez, Génie Industriel, Grenoble 10 novembre 2022.
- Avec Chloé Bonifas, animation d'un séminaire participatif « **Les valeurs du projet IngéPLUS** » pour accompagner la genèse du projet IngéPLUS (Grenoble et Toulouse INP), visant à accompagner des étudiants en BTS vers et pendant un parcours ingénieur, Toulouse, 2 juin 2022.
- Participation à la table-ronde de l'événement « **Les machines sont-elles vraiment intelligentes** ? », organisé par le CCSTI La Casemate, Grenoble, 10 février 2022.

Activités collectives de recherche

- Avec Dakota Root, Chloé Bonifas, Thierry Ménissier (chaire Ethique & IA), co-organisation du colloque international « **Intelligence artificielle et Transformations du travail** », Grenoble, du 20 au 22 novembre 2023.
- Avec Thierry Ménissier (chaire Ethique & IA), co-organisation du séminaire « **Les concepts de l'éthique algorithmique** », Grenoble, 5 séances en 2021-2022, 3 séances en 2022-2023.
- Avec Céline Cholez, Marion Bernard, Jérémy Eydieux (cluster Innovations for Resilience), co-organisation du séminaire « Les données citoyennes dans la gestion des risques », 4 séances au deuxième semestre 2023-2024.