HESAM UNIVERSITÉ

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire de Conception de Produits et Innovation – Campus de Paris

THÈSE

présentée par : **Antoine FEUGIER**

soutenue le : **26 octobre 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**
préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**
Spécialité : **Génie Industriel**

Modélisation, formalisation et mise en place d'une méthodologie de transformation à grande échelle de la fonction maintenance pour la rendre plus performante. Cas d'application à un grand service public d'assainissement et de traitement des eaux usées.

THÈSE dirigée par :
Pr. AOUSSAT Améziane

et co-encadrée par :
Dr. BENFRIHA Khaled

Jury

Mme Julie LE CARDINAL, Professeur des Universités, LGI, Centrale Supélec	Présidente
M. Xavier FISCHER, Professeur des Universités, ESTIA Recherche, ESTIA	Rapporteur
M. Pierre LAGARRIGUE, Professeur des Universités, ICA, INUC	Rapporteur
M. Thierry GIDEL, Professeur des Universités, TSH, UTC	Examinateur
M. Améziane AOUSSAT, Professeur des Universités, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Khaled BENFRIHA, Maître de Conférences HDR, LCPI, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Jacques OLIVIER, Directeur Général, SIAAP	Invité
M. Olivier BOULY, Directeur Technique adjoint, SIAAP	Invité

THÈSE

« Le génie c'est 1% d'inspiration et 99% de transpiration. »

- Thomas Edison

Remerciements

Cette thèse de doctorat représente le fruit d'un travail de recherche et de remise en question d'un peu plus de trois années. C'est également l'aboutissement d'un travail collectif issus de nombreux échanges. Ainsi, c'est travaux sont dédiés à tous celles et ceux qui m'ont aidé, accompagné et soutenu et avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et de partager.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Julie LE CARDINAL, du Laboratoire Génie Industriel de l'école Centrale Supélec d'avoir accepté d'évaluer mes travaux et de présider mon jury de thèse. Je souhaite remercier le Professeur Xavier FISCHER, du laboratoire ESTIA Recherche de l'Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées, ainsi que le Professeur Pierre LAGARRIGUE, de l'Institut National Universitaire Champollion d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs. Leurs analyses et commentaires constructifs m'ont permis de prendre suffisamment de recul sur mes travaux de thèse pour préparer au mieux ma soutenance. Je tiens également à remercier le Professeur Thierry GIDEL, du département Technologie et Science de l'Homme de l'Université Technologique de Compiègne, d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse en qualité d'examinateur.

Je souhaite à présent remercier mon directeur de thèse, le Professeur Améziane AOUSSAT, directeur du Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) pour la confiance qu'il m'a accordée dès que je suis venu le voir avec l'idée de poursuivre mes études après mon diplôme d'ingénieur (j'avais en tête de faire uniquement une année supplémentaire via le mastère spécialisé '*Manager de la maintenance*'), ainsi que son aide et ses conseils tout au long de mon projet de thèse. Je remercie le Docteur Khaled BENFRIHA, maître de conférence HDR au sein du LCPI pour son aide précieuse et ses conseils avisés. A travers eux j'en profite pour remercier tout le personnel du LCPI ainsi que mes camarades doctorants avec qui j'ai pu passer d'excellents moments et partager mes doutes et difficultés quotidiennes de la vie d'un doctorant.

Je souhaite remercier David ALEXANDRE pour son rôle de trait d'union entre le SIAAP et les Arts et Métiers, mais également et avant tout pour son accompagnement tout au long de mon projet de thèse, ses conseils, ainsi que son partage d'expérience illustré de nombreuses anecdotes qui je pense me serviront tout au long de ma carrière.

A présent, je tiens à remercier Jacques OLIVIER, Directeur Général du SIAAP pour ses précieux conseils, et l'a confiance qu'il m'a accordée en m'offrant au travers du Projet SIAAP 2030 un véritable terrain d'expérimentation à taille industrielle pour développer mes travaux de thèse. A travers lui, j'en profite pour remercier l'ensemble des agents du SIAAP qui m'ont accueilli avec bienveillance et ont pris le temps de répondre à mes nombreuses sollicitations.

Je souhaite remercier Olivier BOULY pour son accueil au sein du SIAAP et des équipes de la Direction Technique, son partage de connaissances lors de longs échanges passionnants, ainsi que son aide et son accompagnement tout au long de mon projet de thèse. Au sein de ses équipes je tiens à remercier tout particulièrement Fabrice AJAVON pour son aide et surtout, de m'avoir permis de pouvoir me concentrer sur mes travaux de thèse au sein du SIAAP ; Stéphane LE HIR et Sambaz HUYUK (mes fournisseurs de données GMAO) pour les diverses requêtes et extractions de la GMAO effectuées ; et l'ensemble de mes collègues du service *Gestion Patrimoniale et Sûreté de Fonctionnement*. Je remercie aussi Sandra FERREIRA pour sa bienveillance et l'aide qu'elle m'a apportée pour la relecture de ma thèse ; Jean-Pierre TABUCHI pour son accompagnement dans la préparation de mon échange avec Waternet et l'ouverture aux autres utilités de traitement des eaux usées dans le monde ; et Saskia HOLTHUIJSEN pour son accueil chaleureux chez Waternet.

Enfin je souhaite remercier mes proches et ma famille, notamment mes parents qui m'ont offert le luxe de pouvoir attendre que mon projet de thèse débute, et Sylvie qui m'a supporté au quotidien pendant ces trois années et demi de thèse et ce jusqu'à la soutenance.

Table des matières

Remerciements **5**

Introduction générale **9**

A. Cadre et objet de la recherche 9

B. Contexte général de la problématique 9

C. Champ de la problématique 11

D. Structure du document 12

Chapitre 1 : Contexte et positionnement de la thèse **16**

I. Positionnement scientifique 17

1. Positionnement de la recherche 17

2. Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse 18

II. Contexte industriel 20

1. La structure d'accueil 20

2. Le contexte industriel 22

III. État de l'art 25

1. La maintenance industrielle 25

2. Les modèles d'optimisation de la maintenance 40

3. La maintenance pour l'industrie 4.0 58

4. La conduite du changement 68

5. Synthèse de l'état de l'art 74

Chapitre 2 : Problématique et hypothèse de résolution **78**

I. Enoncé de la problématique de recherche 78

II. Hypothèse de résolution 80

III. Proposition d'une méthodologie globale 81

1. Présentation générale de la méthodologie 81

2. Première phase de la méthodologie : analyses de la fonction maintenance 83

3. Deuxième phase de la méthodologie : outils d'optimisation de la maintenance 95

4. Troisième phase de la méthodologie : Mise en œuvre et pilotage 104

Chapitre 3 : Expérimentation **117**

I. Le projet « *SIAAP 2030 »* 118

1. Présentation globale de la démarche « SIAAP 2030 » 118

2. Articulation du projet de thèse vis-à-vis du projet SIAAP 2030 120

II. Première phase : analyses de la fonction maintenance 121

1. Analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale 121

2. Analyse Microscopique de la maintenance 126

3. Analyse de la qualité des données 130
III. Deuxième phase : outils d'optimisation de la maintenance 137
1. Améliorer l'efficacité de la maintenance 137
2. Améliorer l'efficience de la maintenance 146
IV. Troisième phase : mise en œuvre et pilotage 150
1. Ordonnancement des opérations de maintenance 151
2. Adaptation de l'organisation de maintenance 153
3. Construction de tableaux de bord pour évaluer et piloter la performance de la maintenance 155
V. Synthèse des résultats et discussion 158
1. Mise en œuvre de la méthodologie 158
2. Evolution de la fonction maintenance 166
3. Discussions 169
Chapitre 4 : Apports, conclusion et perspectives 176
I. Apport de nos travaux de recherche 176
II. Limitations 179
III. Conclusion 180
IV. Perspectives 182
1. La gestion de la donnée au cœur du processus de la gestion du patrimoine 182
2. Comment structurer la gestion de la donnée patrimoniale ? 183
3. Comment seront utilisées et enrichies ces données patrimoniales ? 185
Bibliographie 187
Annexes 196
Table des figures 233

Introduction générale

A. Cadre et objet de la recherche

Le travail présenté dans cette thèse de doctorat, dont l'intitulé est « Modélisation, formalisation et mise en place d'une méthodologie de transformation à grande échelle de la fonction maintenance pour la rendre plus performante », s'inscrit dans le cadre du programme de recherche initié par le Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation – LCPI – sous la direction du professeur Améziane AOUSSAT. Ce programme de recherche a pour objet d'apporter des éléments de réponses à la question principale suivante : *Comment faire évoluer les entreprises d'envergure pour améliorer leur fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques ?*

En effet, bien que les avantages des technologies de l'industrie 4.0 pour la maintenance soient pour la plupart identifiés et compris par les industriels, le niveau d'implémentation de ces technologies est encore faible (Frank et al., 2019). Plusieurs raisons sont identifiées dans la littérature, en particulier le manque de moyens et l'absence de stratégie de la part des entreprises (Colli et al., 2019; Ghobakhloo, 2018)

L'objectif final de cette recherche est de proposer une méthodologie pour guider les entreprises dans la formalisation et la mise en œuvre d'un modèle managérial global de la fonction maintenance permettant de l'améliorer en prenant en compte les nouveaux apports technologiques. A terme, ce travail permettra aux professionnels de la maintenance et plus généralement au management de mettre en œuvre les outils d'optimisation nécessaires pour maîtriser et piloter la fonction maintenance, puis l'améliorer.

Cette thèse s'inscrit dans le domaine du Génie Industriel. Elle a été réalisée au sein du LCPI de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers et en partenariat avec le Syndicat Interdépartemental de l'Assainissement pour l'Agglomération Parisienne – SIAAP – un service public de traitement et d'assainissement des eaux usées comportant un peu plus de 1 700 personnes qui cherche à optimiser sa fonction maintenance.

B. Contexte général de la problématique

Au fil des années, la maintenance est devenue une fonction stratégique pour les entreprises industrielles. Garante du bon fonctionnement des équipements, elle contribue également à améliorer la sûreté des usines, la fiabilité des installations, la disponibilité des équipements ou encore la qualité des produits. Pour autant, quantifier ses apports s'avère plus difficile qu'apprécier les coûts qu'elle engendre. Selon les secteurs industriels concernés et les

installations exploitées, les coûts de maintenance représentent 20 à 60 % des coûts d'exploitation (Fraser et al., 2015; Murthy et al., 2002), faisant alors de ce poste un véritable enjeu économique qui légitime les démarches d'optimisation dédiées à cette fonction.

La maintenance constitue un dilemme pour l'industrie que (Galar and Seneviratne, 2016) formalisent ainsi : « Comment maximiser la disponibilité au moindre coût ? ». Bien que cette question soit depuis longtemps identifiée, y répondre n'a pas été la priorité des entreprises au cours de ces dernières années (McKinsey & Company, 2020). Récemment la situation a évolué, et améliorer la performance de la maintenance devient une priorité pour les dirigeants d'entreprise qui cherchent à optimiser cette activité au sein de leurs établissements pour combler leur retard. Toutefois, malgré la multitude de solutions existantes (plus de cent modèles et outils d'optimisation de la maintenance recensés dans la littérature) le sujet reste complexe puisque 70 % des transformations de maintenance échouent (McKinsey & Company, 2020). Pour éviter ces écueils, il importe d'étudier et d'appréhender à la fois le fonctionnement global de la maintenance industrielle et les leviers d'optimisation inhérents à celle-ci. Parmi ces leviers, les avancées techniques (e.g. l'Internet des Objets, les analyses de données de masse) représentent un potentiel d'optimisation important. Selon (McKinsey & Company, 2015) la maintenance prévisionnelle permet de réduire de 30 à 50 % le temps d'indisponibilité des équipements. Pour atteindre ce niveau d'ambition élevé, les organisations de la maintenance ont encore beaucoup à faire (Roy et al., 2016). Bien que la littérature scientifique offre une vue détaillée des challenges techniques pour le futur de la maintenance, elle néglige l'impact organisationnel que peuvent avoir ces évolutions (Bokrantz et al., 2017).

Dans le cas du SIAAP, où les coûts de maintenance représentent environ un tiers des coûts d'exploitation, la maintenance est un enjeu économique crucial. Depuis 2016, à travers son projet d'entreprise « *SIAAP 2030* », le SIAAP porte une attention particulière à la fonction maintenance, et cherche notamment à en améliorer la performance économique.

Lors des deux dernières décennies, le SIAAP s'est davantage consacré à faire évoluer son patrimoine industriel – réalisations d'importantes opérations de construction – pour répondre aux nouvelles exigences environnementales et démographiques, reléguant ainsi au second plan les enjeux liés à la maintenance. De ce fait, les pratiques de maintenance ont peu évolué et le SIAAP est resté dans une approche réactive à l'égard de la gestion des activités de maintenance au lieu de basculer dans une démarche proactive. De manière générale, les bonnes pratiques de maintenance telles qu'identifiées dans la littérature (Wireman, 2015) sont très peu implémentées, le partage d'informations entre les différents sites de production est limité, et la

capitalisation des retours d'expérience est peu développée. Il est donc nécessaire de réorganiser les activités de maintenance du SIAAP pour lui permettre d'optimiser la fonction maintenance. Notre thèse s'intéresse à la mise en place d'une organisation de la maintenance dans cette entreprise, permettant dans un premier temps au management de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite l'améliorer notamment en s'appuyant sur les technologies de l'industrie 4.0. Plus généralement, nous pensons que la mise en œuvre de ces nouvelles techniques industrielles doit être précédée d'un travail préparatoire concernant plusieurs couches de l'entreprise dont l'organisation et les compétences. C'est dans ce contexte que notre travail trouve son originalité en proposant une passerelle pour intégrer les évolutions technologiques dans les activités quotidiennes de maintenance.

C. Champ de la problématique

Le champ de la problématique couvre d'une part les aspects méthodologiques, avec notamment une réflexion sur l'imbrication de nouvelles technologies dans la continuité des méthodes conventionnelles. D'autre part, elle couvre les aspects de gouvernance, en portant une réflexion sur l'accompagnement managérial et structurel. Notre problématique de recherche concerne ainsi les thèmes d'intégration de méthode, de choix d'outils, et de management du changement ; des thèmes qui s'inscrivent bien dans ceux portés par le LCPI. Notre objectif est de proposer au SIAAP, et plus généralement aux entreprises de taille intermédiaire et supérieure, une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance pour la rendre plus performante.

Nous avons initié notre recherche par un état de l'art autour de la maintenance industrielle afin d'identifier les principales caractéristiques de la fonction maintenance et son rôle dans l'industrie. Il en ressort que la maintenance contribue fortement à l'atteinte des objectifs de disponibilité des équipements de production et que la dimension managériale est un élément majeur dans la bonne tenue des activités de maintenance. Nous avons ensuite cherché quels outils et pratiques permettaient d'optimiser la maintenance, et dans quelles mesures ils pouvaient s'appliquer à un contexte industriel. Cela nous a permis d'une part de mettre en évidence les contraintes d'application et les difficultés de mise en œuvre des solutions d'optimisation de la maintenance présentes dans la littérature, et d'autre part d'identifier les recommandations et les paramètres pertinents influençant la bonne utilisation de ces modèles. Enfin, nous avons complété notre étude de l'état de l'art en lien avec les aspects techniques et humains de la maintenance. Nous avons ainsi pu identifier et comprendre les apports des

technologies de l'industrie 4.0 pour la maintenance et distinguer plusieurs recommandations favorisant une dynamique de changement nécessaire à la mise en œuvre de nouveaux outils et habitudes de travail.

Au-delà d'identifier les recommandations permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance, cette étude a permis de souligner l'écart important entre les solutions d'optimisation de la maintenance proposées par le monde académique et les contraintes du monde industriel. Elle a mis également en évidence le manque de solutions pour accompagner les entreprises dans la mise en œuvre et l'intégration au sein de leurs activités de maintenance d'outils d'optimisation, aussi bien techniques que méthodiques ou organisationnels. Nous avons ainsi établi notre problématique de recherche visant à proposer une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance permettant aux entreprises d'envergure de l'améliorer en prenant en compte les nouveaux apports technologiques.

D. Structure du document

Ce document s'articule autour de quatre chapitres, à savoir ; 1. Contexte et positionnement de la thèse ; 2. Problématique et hypothèse de résolution ; 3. Expérimentation ; 4. Apports, conclusion et perspective.

Dans le premier chapitre, « *Contexte et positionnement* », nous présentons de manière synthétique notre positionnement par rapport au domaine du génie industriel. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la maintenance industrielle et ses principales caractéristiques. Nous présentons ensuite une étude de l'état de l'art sur les modèles d'optimisation de la maintenance et leurs spécificités, les différents usages et apports de l'industrie 4.0 pour la maintenance, ainsi que sur les principales solutions et facteurs clés de succès dans la conduite du changement. Nous formalisons les principaux constats de l'état de l'art à travers une synthèse, où nous identifions également les recommandations proposées par la littérature. Cette analyse nous permet de mettre en avant les éléments essentiels impactant l'optimisation de la maintenance et apporte des éléments de construction pour notre problématique de recherche ainsi que notre hypothèse de résolution.

Le deuxième chapitre, « *Problématique et hypothèses de résolution* », nous permet de poser notre problématique de recherche et notre hypothèse de résolution en nous appuyant sur les constats issus de l'état de l'art. Nous présentons ensuite la construction de notre méthodologie que nous proposons pour prendre en compte notre hypothèse et parvenir à formaliser et mettre

en place un modèle managérial global de la fonction maintenance pour répondre à la problématique.

Le troisième chapitre, « *Expérimentation* », présente l'expérimentation de notre méthodologie dans le contexte industriel du SIAAP et les résultats obtenus qui nous ont permis de valider les différentes étapes. Il se termine par une discussion des résultats de l'application de notre méthodologie, aboutissant à la validation de notre hypothèse de recherche.

Le quatrième chapitre « *Apports, conclusion et perspectives* » permet de conclure notre mémoire de thèse en présentant les apports de nos travaux de recherche et sur l'état de la fonction maintenance au SIAAP à l'issue de cette thèse. Ce chapitre s'achève par la proposition de perspectives d'amélioration de la méthodologie en lien avec la maîtrise des données industrielles propres à la maintenance.

Chapitre 1

Contexte et positionnement de la thèse

Chapitre 1 : Contexte et positionnement de la thèse

Dans ce premier chapitre, nous présentons le positionnement scientifique (partie I) de notre recherche et le contexte industriel (partie II). Nous définissons alors les domaines et les acteurs qui interagissent avec notre recherche, puis présentons comment ils s'inscrivent dans les axes de recherche du Laboratoire de Conception de Produits et d'Innovation (LCPI). Ensuite, nous nous intéressons au Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP), la structure d'accueil de ces travaux de recherche axés sur la maintenance. Pour apporter une réponse aux problématiques soulevées par le SIAAP, une étude de l'état de l'art concernant la maintenance industrielle et les solutions d'optimisation de la maintenance a été nécessaire (partie III).

Notre recherche débute par la maintenance industrielle pour identifier et définir ses principaux composants, son contexte et ses enjeux (section III.1). Cette première analyse met en exergue une notion importante : le management de la maintenance. Cette discipline permet d'instaurer et de coordonner les activités de maintenance. Puis, nous nous sommes intéressés aux solutions existantes d'optimisation de la maintenance (section III.2). Nous avons alors distingué les modèles d'optimisation quantitatifs des modèles qualitatifs et identifié un troisième groupe : les approches globales d'optimisation de la maintenance. Cette analyse a soulevé l'importance capitale de disposer de données industrielles fiables. Ce point, pourtant essentiel, semble ignoré ou peu considéré (de Jonge and Scarf, 2019) par certains modèles d'optimisation et, s'avère être disqualifiant lorsque nous cherchons à les appliquer à des cas industriels concrets. Face à cette difficulté, l'industrie 4.0 - grâce notamment aux nouvelles technologies de l'information et de la communication, peut contribuer à une optimisation supplémentaire pour la maintenance. Par conséquent, nous avons cherché à identifier comment les technologies issues de l'industrie 4.0 pouvaient se positionner dans une démarche globale d'optimisation de la maintenance et comment les mettre en œuvre (section III.3). Enfin, la maintenance étant avant tout réalisée par des femmes et des hommes, lui appliquer une nouvelle organisation, de nouveaux outils technologiques ou de nouveaux modèles d'optimisation serait voué à l'échec sans accompagnement. Nous avons donc exploré la littérature concernant la conduite du changement (section III.4) pour identifier les fondamentaux et principaux facteurs - clés de succès - les étapes à respecter et, les prérequis à mettre en œuvre.

I. Positionnement scientifique

1. Positionnement de la recherche

En abordant la question d'optimisation de la maintenance, notre recherche se positionne dans le domaine du génie industriel. Contrairement à l'industrie, la recherche académique a depuis longtemps considéré la maintenance comme une fonction stratégique ; elle a donc cherché à l'outiller et à l'optimiser. Par conséquent, la littérature scientifique abonde en modèles d'optimisation de la maintenance. Cependant, les solutions proposées abordent souvent la question d'optimisation de la maintenance sous un angle mathématique, négligeant la nature de la maintenance et ses multiples aspects techniques, managériaux et organisationnels. Cet oubli les rend quasiment inapplicable dans un contexte industriel.

Aujourd'hui la maintenance occupe un rôle stratégique – au même titre que la production – au sein des usines. Gage d'un bon fonctionnement, elle représente pour certains secteurs industriels un véritable enjeu économique. Les nouvelles technologies - telles que les capteurs de suivi de la dégradation des équipements - facilitent la collecte d'informations nécessaire au bon fonctionnement des modèles d'optimisation de la maintenance et offrent ainsi un potentiel d'optimisation considérable. Les attentes envers la maintenance sont élevées et les technologies issues de l'industrie du futur semblent y répondre. Pour autant, par manque de moyens et de compétences, peu d'entreprises les utilisent et celles qui le peuvent se confrontent à un manque de méthodologie leur permettant d'obtenir tous les avantages de ces progrès technologiques. Les solutions technologiques à elles seules ne peuvent répondre de manière pérenne aux besoins d'optimisation de la maintenance. Pour proposer une réponse adaptée aux contraintes de l'industrie, nous avons abordé dans cette recherche la maintenance dans sa globalité en considérant les dimensions stratégiques, humaines, technologiques et organisationnelles de la maintenance. Ainsi, notre étude se positionne à l'interface des domaines de recherches liés au management de la maintenance, à la gestion du changement et à la maintenance 4.0.

Dans le contexte de notre thèse nous avons cherché à optimiser la maintenance dans une institution du secteur des utilités, où les coûts de maintenance avoisinent 50% des coûts de fonctionnement et, où les pratiques de maintenance sont encore éloignées des standards. Ainsi, nous avons pu utiliser les différentes solutions et recommandations issues de la littérature pour proposer une solution pertinente et adaptée. Cela se traduit par une contribution méthodologique, applicable dans un contexte industriel et permettant d'optimiser la maintenance tout en la faisant évoluer pour qu'elle bénéficie des nouvelles solutions technologiques.

2. Axes de recherche du LCPI et positionnement de la thèse

La recherche au Laboratoire de Conception de Produits et Innovation (LCPI) porte sur l'optimisation du processus de conception et d'innovation, et au-delà de la dimension technologique, accorde une part importante à la méthodologie et aux outils d'aide à la décision et de pilotage. Le laboratoire s'intéresse à la conception de produits en tant que passage d'un état immatériel (idée, concept, fonction) à un état matériel du produit (plan, maquette, prototype) disponible sur le marché. Il s'agit de définir, proposer et développer un modèle générique du processus de conception et d'innovation touchant l'ensemble des phases du cycle de vie d'un produit. L'une des originalités de la recherche du LCPI est l'effort particulier porté sur les phases amont du processus de conception et d'innovation ainsi que sur l'intégration et l'anticipation des phases aval avec les phases amont. La figure 1 représente les axes et les thèmes de recherche du laboratoire.

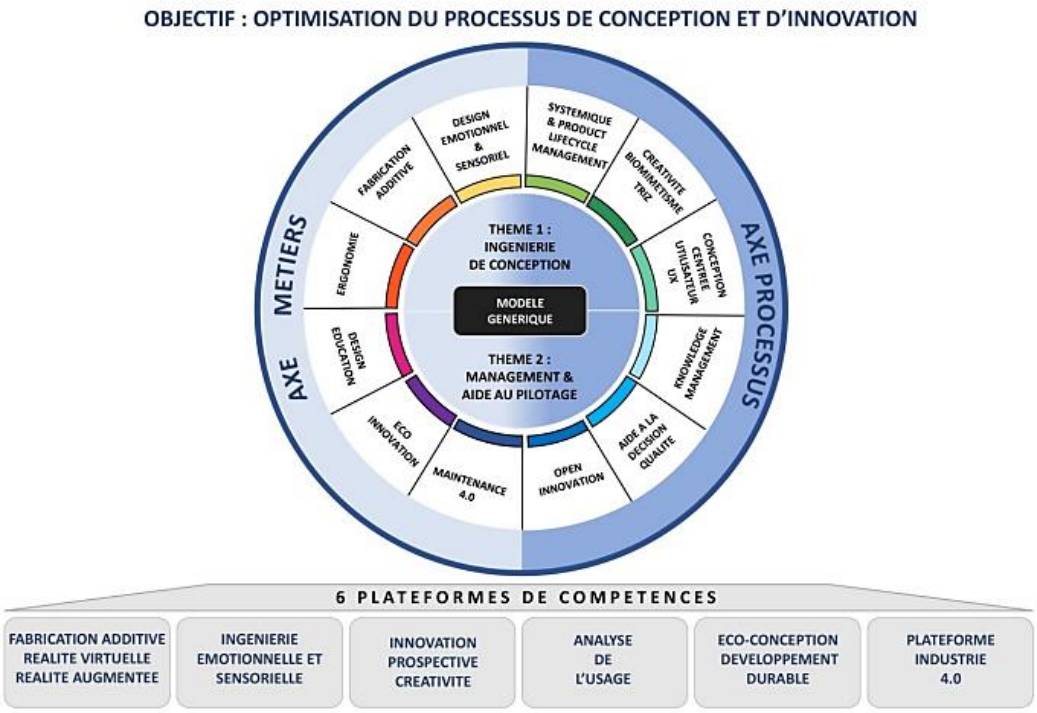


Figure 1: Thèmes et axes de recherche du LCPI

Notre thèse se positionne sur l'axe « Métiers » du laboratoire dans le sens où nous cherchons à formaliser une méthode pour optimiser la fonction maintenance des entreprises. La méthode présentée permet dans un premier temps de maîtriser et piloter la maintenance pour ensuite être en capacité de l'optimiser. De ce fait nous la situons également dans le thème du « management et de l'aide au pilotage ». La thèse offre ainsi un outil aux industriels pour faire évoluer leur

fonction maintenance vers une forme plus performante tout en la préparant à intégrer efficacement de nouvelles solutions technologiques issues de l'industrie 4.0.

Par ailleurs, cette thèse peut être perçue comme un travail préparatoire favorisant la mise en œuvre - dans un contexte industriel - des modèles et solutions développées par le LCPI, tels que celui proposé par le docteur Oussama ADJOUL (Adjoul, 2019). Par conséquent, notre recherche permet au laboratoire de renforcer ses liens avec l'industrie tout en développant son expertise dans le domaine de la maintenance.

II. Contexte industriel

1. La structure d'accueil



Figure 2: Logo type de l'entreprise

Créé en 1970, suite à la réforme administrative portant sur les départements de la Seine et de la Seine-et-Oise, le SIAAP – Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne – transporte et dépollue quotidiennement les eaux usées de 9 millions de Franciliens. Le périmètre d'intervention de cet établissement public couvre 4 départements [Paris (75), Hauts-de-Seine (92), Seine-Saint-Denis (93) et Val-de-Marne (94)] et 180 communes réparties sur les départements du Val-d'Oise, de l'Essonne, des Yvelines et de la Seine-et-Marne, liés au Syndicat par convention. Le SIAAP est administré par 33 conseillers départementaux, désignés par les 4 départements constituants (75, 92, 93, 94). Il dispose d'un budget annuel d'1,3 milliard d'euros, pour assurer sa mission de service public à l'échelle de l'agglomération parisienne. Les ressources du SIAAP proviennent essentiellement de la redevance assainissement sur la facture d'eau potable et des subventions de l'Agence de l'Eau Seine Normandie. Un peu plus de 1 700 employés assurent les missions de service public d'assainissement. Le SIAAP - avec ses 440 km de canalisations, plus de 900 000 m^3 de capacité de stockage des eaux pluviales et 6 usines de dépollution des eaux usées réparties sur l'ensemble du bassin de collecte (figure 3) - transporte et traite chaque jour près de 2,5 millions de m^3 d'eaux usées issues des usages domestiques et industriels, faisant de lui le premier service public d'assainissement d'Europe. L'ensemble de ces usines, ainsi que les réseaux de transport et de de stockage constituent le patrimoine industriel du SIAAP.

Depuis 2016, le SIAAP a entrepris de définir un projet stratégique ambitieux à l'horizon 2030 – « *SIAAP 2030* » - pour anticiper et répondre à l'urbanisation francilienne, la diminution des volumes d'eaux et, aux évolutions règlementaire et sociétale. Ce projet trace des perspectives à une échelle de temps en phase avec les exigences réglementaires croissantes (DERU[1], DCE[2],

[1] La directive européenne du 21 mai 1991, relative au traitement des eaux, résiduaires urbaines (DERU), impose aux Etats membres la collecte et le traitement des eaux salies pour toutes les agglomérations.

[2] La directive cadre sur l'eau (DCE) demande aux Etats membres, à échéance de 2015, le retour du bon état chimique et écologique des eaux superficielles et souterraines : la non-détérioration de l'existant, la suppression des rejets de substances dangereuses dites "prioritaires" d'ici à 2020.

loi de transition énergétique), les réformes institutionnelles (Métropole du Grand Paris), et les effets anticipés de la dynamique démographique, du dérèglement climatique et de l'urbanisation croissante et l'imperméabilisation des sols qui en résulte. A la suite d'un état des lieux complet, intégrant cinq approches complémentaires (Groupe de travail thématiques, entretiens internes et visite des sites, analyses quantitatives, séminaire élargi avec 450 participants, et benchmarks externes avec des services publics d'assainissement comparables) plusieurs enjeux ont émergé. Pour répondre à ces derniers, un plan d'action – décliné en trois axes stratégiques et onze programmes - a été élaboré. Parmi ces huit programmes, nous retiendrons deux programmes concernés par mes travaux de thèse :

- Le programme 3 : Optimiser la maintenance ;
- Le programme 4 : Renforcer la gestion patrimoniale et la maîtrise du processus d'investissement.

Ces deux programmes traduisent non seulement l'importance de la maintenance au sein de la démarche de gestion patrimoniale du SIAAP, mais aussi la volonté et les moyens mis en œuvre pour les améliorer. Ils définissent également le cadre industriel de cette thèse de doctorat.

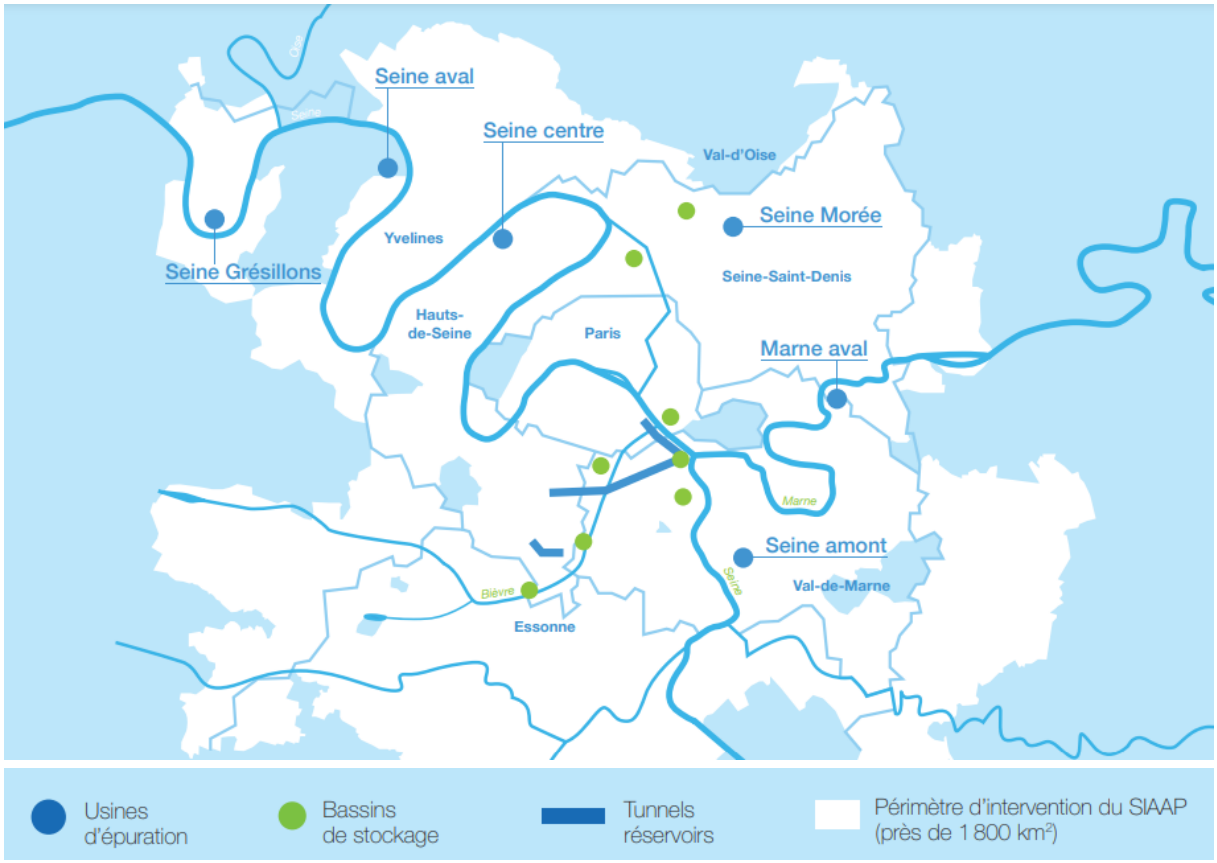


Figure 3: Répartition des usines du SIAAP sur la région île de France

2. Le contexte industriel

Aujourd'hui, le SIAAP assure pleinement sa mission « industrielle » d'assainissement dans une logique de développement durable en rendant à la Seine et à la Marne une eau propre et propice au développement du milieu naturel. Pour répondre aux nouvelles exigences environnementales et démographiques, l'entreprise a réalisé - au cours des vingt dernières années - de nombreuses opérations de construction. Les investissements engagés pour augmenter la capacité avec des process de traitement innovants et performants, ajoutés à la baisse des subventions de l'Etat, ont engendré une augmentation de la redevance « assainissement » qui s'est donc répercutée sur le prix de l'eau. Dans ce contexte, le SIAAP doit pérenniser une qualité de service et une performance épuratoire adaptée aux exigences environnementales dans un contexte économique de plus en plus contraint. Cela se traduit par une volonté affirmée en 2016 dans le cadre du projet *SIAAP 2030* de délivrer le meilleur service au meilleur coût, que nous pouvons exprimer par la problématique industrielle suivante :

Comment assurer la disponibilité des infrastructures de traitement et de transport des eaux usées au meilleur coût ?

Comme dans beaucoup d'industries où la valeur ajoutée du produit final est faible (le nucléaire, la pétrochimie, ou encore l'industrie du charbon), la maintenance représente pour le SIAAP une part importante des dépenses. La figure 4 représente la ventilation des dépenses d'exploitation de l'usine Seine Aval. Cette répartition révèle qu'un tiers du budget de fonctionnement de l'usine correspond au « poste maintenance » (la moitié du personnel est rattaché à des activités de maintenance et la totalité des prestations extérieures correspond à des opérations de maintenance externalisée). Globalement, la maintenance représente pour le SIAAP 40 à 50% des dépenses d'exploitation. Par son histoire et l'implantation des sites, le SIAAP dispose d'une organisation décentralisée avec des processus et des pratiques hétérogènes - six usines d'épuration réparties sur une grande partie de l'Île-de-France (figure 3). A cette spécificité géographique s'ajoute une certaine autonomie de gestion, qui n'a pas permis une communication inter-sites et un partage d'expérience suffisants. Cette

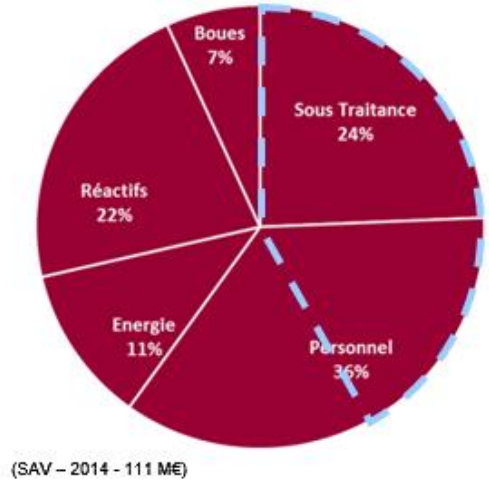


Figure 4: Répartition globale des dépenses d'exploitation 2014 de l'usine de Seine Aval

caractéristique favorise l'individualisme et tend à entraver la communication inter-sites, comme le partage des retours d'expériences. De plus, la culture d'entreprise de cette institution publique, doublée de la nécessité d'investir massivement en capacité de traitement ces vingt dernières années a historiquement favorisé une politique de moyens plutôt que de performance technico-économique. A ces points s'ajoutent les exigences environnementales des directives européennes (DERU et DCE) qui ont conduit le SIAAP à engager rapidement plusieurs investissements pour faire évoluer les procédés de traitement des eaux usées. Le benchmark des coûts unitaires de maintenance (figure 5) souligne effectivement que le coût de la maintenance des usines du SIAAP dépasse généralement celui d'autres entités comparables.

Ces différents constats confirment que la maintenance représente pour le SIAAP un levier important d'optimisation économique qu'il faut utiliser.

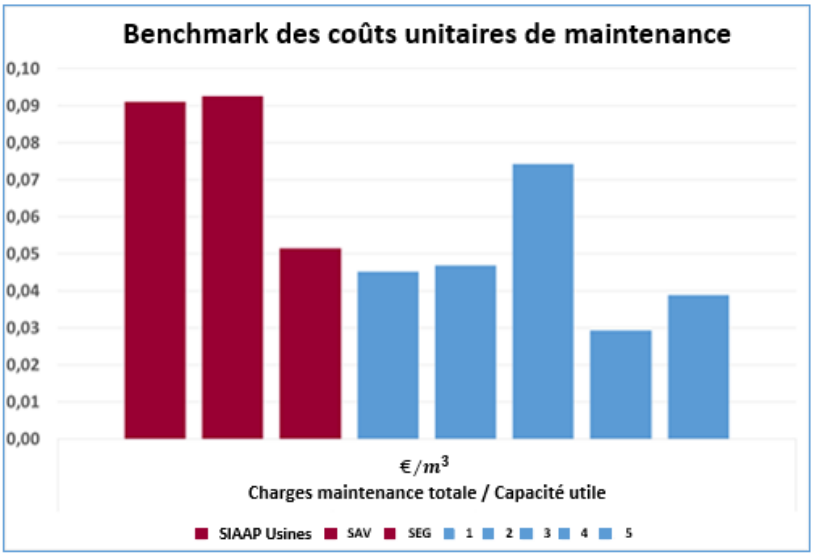


Figure 5: Benchmark des coûts unitaires de maintenance

L'enjeu de maintenance au SIAAP est aussi un enjeu de gestion patrimonial compte tenu de la valeur élevée de ses actifs et de leur durée de vie importante, en raison de la permanence de la nature du service réalisé et de son caractère non délocalisable. La figure 6 formalise les deux constats résultant des spécificités du SIAAP. Elle met en évidence l'importance pour cet établissement de veiller à une gestion optimale de ses budgets, en anticipant ses besoins en investissement. A ce titre, les phases de réhabilitation de ses ateliers sont des éléments dimensionnant.

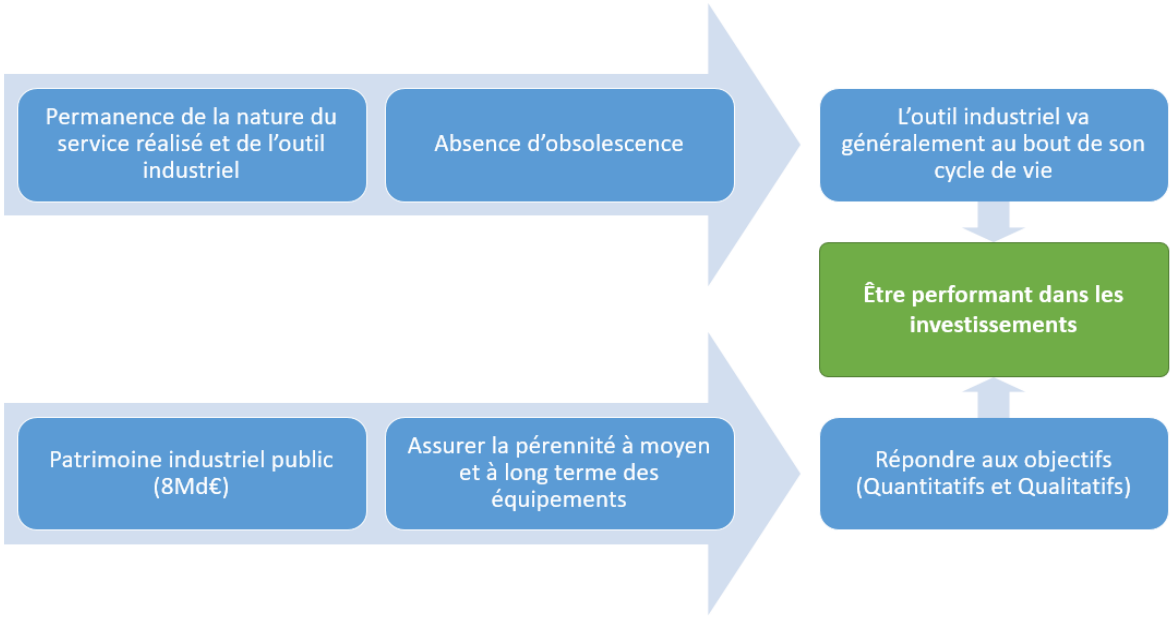


Figure 6: Formalisation des spécificités du SIAAP

Cette analyse préliminaire du contexte industriel du SIAAP nous permet de cerner les principaux enjeux et objectifs de son activité de maintenance :

- Améliorer la performance économique de la maintenance tout en conservant le service qu'elle rend ;
- Maintenir le patrimoine industriel à un coût de maintenance et d'investissement optimisé.

III. État de l'art

Le contexte industriel où évolue le SIAAP, et les enjeux auxquels il est confronté, nous amènent à orienter notre étude de l'état de l'art vers la maintenance industrielle. En commençant par approfondir ce domaine, nous identifions les principales caractéristiques de la fonction maintenance et son rôle dans l'industrie. Cela met en évidence son implication directe dans l'atteinte des objectifs de disponibilité des équipements de production. De ce fait, afin de répondre à la problématique industrielle posée, nous poursuivons notre étude en analysant les principaux modèles et solutions d'optimisation de la maintenance, présents dans la littérature. Pour tenir compte des évolutions technologiques, entraînant de profonds changements pour l'industrie, et donc pour les activités de maintenance, nous nous intéressons à l'apport potentiel de ces nouvelles technologies vis-à-vis de l'optimisation de la maintenance. Enfin, la dimension humaine étant un élément essentiel de la fonction maintenance, tout changement ou évolution de cette dernière doit se faire en tenant compte de cet aspect. Nous complétons ainsi notre étude de l'état de l'art en explorant la littérature scientifique concernant la conduite du changement. La figure 7 présente les principaux points d'intérêts traités dans cette partie.

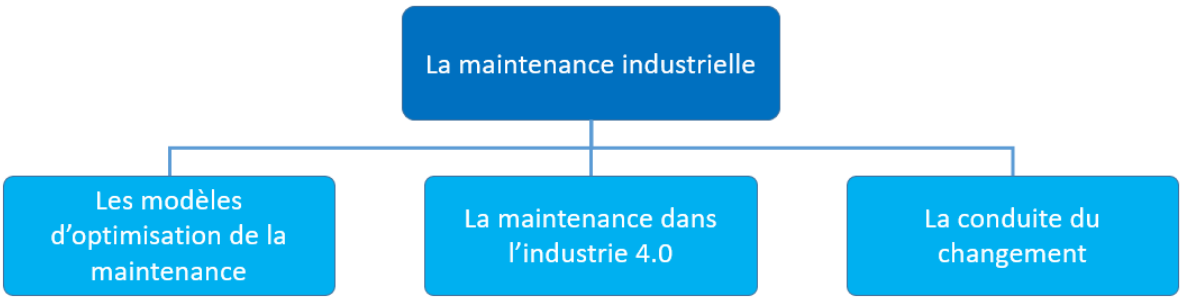


Figure 7: Les quatre domaines principaux couverts dans l'état de l'art

1. La maintenance industrielle

La maintenance joue un rôle important au sein des entreprises industrielles. Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, et donc de compétitivité (Monchy and Vernier, 2010). Bien qu'une définition uniforme existe dans la littérature, les différents termes qui lui sont associés sont quant à eux mal définis et souvent utilisés de façon interchangeable (Velmurugan and Dhingra, 2015). Cet écueil crée de la confusion et complique l'appréhension du fonctionnement de la maintenance. Pour mieux comprendre la cible de notre travail, nous décrivons dans cette sous-partie les

principaux termes associés à la maintenance et leurs interactions. Cela permettra également de poser une définition uniforme pour la suite du manuscrit.

1.1.Les définitions liées à la maintenance et à la sûreté de fonctionnement

La norme française (NF-EN-13306, 2010) définit la **maintenance** comme « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Cette définition présente de manière synthétique le cadre et les principales composantes de la maintenance. Pour assurer la bonne compréhension du document, il importe de préciser certains termes.

Tout d'abord la **fonction requise**, définie comme « une fonction d´une entité dont l´accomplissement est nécessaire pour la fourniture d´un service donné **»** (X60-500, 1988). Lorsqu'une entité est apte à accomplir cette fonction requise, on dit qu'elle est disponible. L'aptitude qui caractérise cet état est la disponibilité.

La **disponibilité** est « l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée » (X60-500, 1988).
Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de l'aide au soutien en maintenance.

La **fiabilité** est « l'aptitude d´une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné » (X60-500, 1988).

La **maintenabilité** est « dans des conditions données d'utilisation, une aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits » (X60-500, 1988).

L'**aide au soutien en maintenance** est « l'aptitude d'une organisation de maintenance à mettre en place les moyens de maintenance appropriés à l'endroit voulu en vue d'exécuter l'activité de maintenance demandée lorsque celle-ci est requise » (X60-500, 1988).

Ces quatre aptitudes caractérisent la **sûreté de fonctionnement**, définie comme « l'aptitude à fonctionner comme cela est requis et lorsque cela est requis » (NF-EN-13306, 2010).

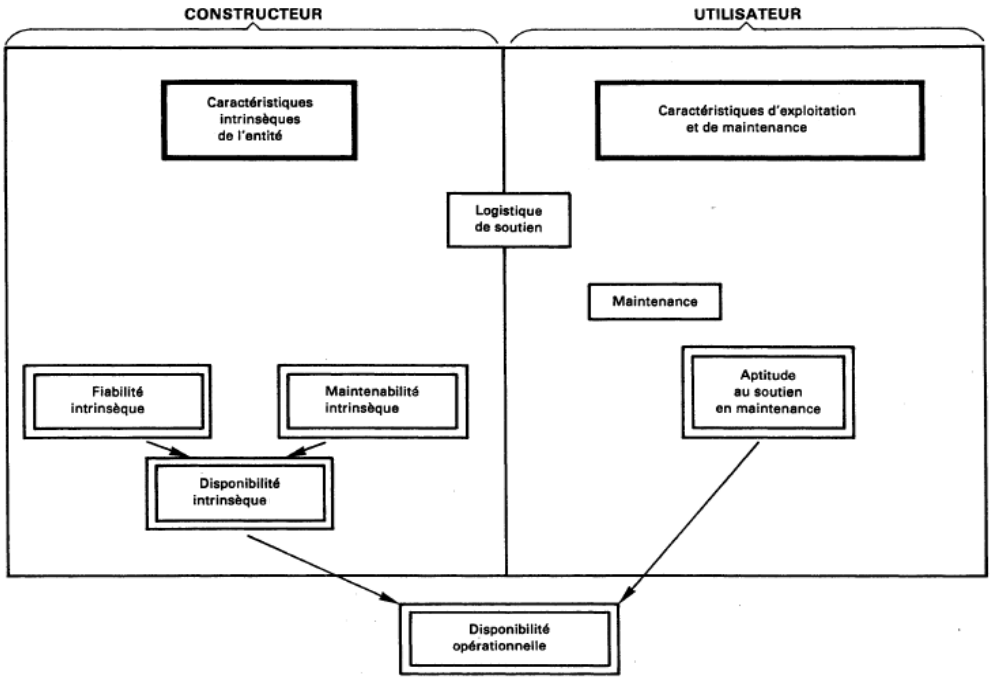


Figure 8: Illustration des concepts généraux présentés dans la norme NF X60-500

La figure 8 illustre les concepts énoncés précédemment et leurs liens en distinguant deux étapes, celle liée au constructeur et celle liée à l'utilisateur. Ces deux étapes (conception et exploitation) constituent une partie du cycle de vie d'un produit. (Asiedu and Gu, 1998) définissent le **cycle de vie d'un produit** comme « *l'intervalle de temps entre la conception d'un produit et son démantèlement* ». Il existe dans la littérature plusieurs décompositions du cycle de vie d'un produit. Nous retiendrons, pour la suite du manuscrit, la décomposition simplifiée ci-dessous (figure 9):



Figure 9: Décomposition simplifiée du cycle de vie d'un produit

La figure 8 distingue également deux formes de disponibilité. Premièrement, la disponibilité intrinsèque du produit issue directement des propriétés originelles du produit en termes de capacité et de performance (de Azevedo, 2009). Ces propriétés proviennent des choix effectués lors de la phase de conception et de fabrication (NF-EN-13306, 2010). Deuxièmement, la disponibilité opérationnelle qui correspond à la disponibilité de l'équipement une fois sa mise

en service effectuée. Elle dépend à la fois de la disponibilité intrinsèque de l'équipement et des conditions d'exploitation. Par définition, la disponibilité opérationnelle sera toujours inférieure ou égale à la disponibilité intrinsèque (de Azevedo, 2009). L'aptitude au soutien en maintenance et les actions de maintenance entreprises permettront d'améliorer la disponibilité opérationnelle de l'équipement.

Les actions de maintenance sont généralement de deux types (Adjoul, 2019) :

- **La maintenance corrective** exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (NF-EN-13306, 2010) ;
- **La maintenance préventive** exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits, est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien (NF-EN-13306, 2010).

Elles sont déclenchées en fonction de différents critères définis par la politique de maintenance. La politique de maintenance est une règle ou ensemble de règles décrivant le mécanisme de déclenchement des différentes actions de maintenance (Pintelon and Parodi-herz, 2008). Le tableau ci-dessous (tableau 1) regroupe les principales politiques de maintenance identifiées dans la littérature.

Politique de maintenance	Définition-Description
Maintenance basée sur les pannes	Maintenance réalisée uniquement après l'apparition d'une panne. Lorsque le taux de panne est constant et/ou que le coûts des pannes est faible cela peut être une bonne politique.
Maintenance systématique	Maintenance exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage indépendamment de l'état du bien. Cela suppose que les opérations de maintenance systématiques sont moins chères que les correctives.
Maintenance conditionnelle	Maintenance basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. Cette politique de maintenance gagne en popularité du fait que les techniques sous-jacentes (analyses vibratoires, mesures diélectriques, ...) deviennent plus accessibles à un meilleur prix.
Maintenance prévisionnelle	Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs. Cette politique de maintenance est au cœur de l'industrie 4.0
Maintenance améliorative	Maintenance exécutée afin d'améliorer les fonctions ou la fiabilité d'un équipement. Cela conduit à modifier la conception de l'équipement.
Maintenance opportuniste	Maintenance exécuté lorsque « l'occasion » de réparer d'autres équipements se présente.

Tableau 1: Définition et description des principales politiques de maintenance présentes dans la littérature (NF-EN-13306, 2010; Pintelon and Parodi-Herz, 2008; Rasovska and Zerhouni, 2006)

Selon leur complexité, les opérations de maintenance nécessitent plus ou moins de ressources et de compétences. La norme (NF-EN-13306, 2010) identifie 5 niveaux de maintenance pour classer les opérations de maintenance suivant leur complexité et le niveau de qualification requis pour être réalisée par un salarié.

1.2.Les objectifs de la maintenance

Selon la norme (NF-EN-13306, 2010), **les objectifs de maintenance** sont « les buts fixés et acceptés pour les activités de maintenance ». Avec l'importance grandissante accordée à la fonction maintenance au cours des dernières décennies (Waeyenbergh and Pintelon, 2002), les activités de maintenance ont également beaucoup évolué au sein des entreprises. Par conséquent le périmètre de la maintenance s'est agrandi et ses objectifs se sont multipliés. La société des ingénieurs en maintenance australienne indique que la maintenance consiste à atteindre les capacités requises des actifs dans un contexte économique donné (Murray et al., 1995). La maintenance comprend également les décisions liées à l'ingénierie de conception qui permettent d'améliorer la capacité d'un équipement. La capacité étant l'aptitude à exécuter une fonction spécifiée dans une gamme de niveaux de performance pouvant être liés au taux de production, à la qualité ou encore à la sécurité (Tsang, 2002). Comme objectifs, (Monchy and Vernier, 2010) ajoutent au côté technique de la maintenance, l'aspect économique (réduire les coûts de défaillance) et social (revaloriser la nature du travail, réduire le risque d'accidents). Tous ces objectifs sont autant de critères à considérer pour améliorer la maintenance. Au total, en 2019 (Syan and Ramsoobag, 2019) en recensaient plus d'une vingtaine. Pour la suite du manuscrit, nous retiendrons la classification proposée par (Muchiri et al., 2011) qui regroupent les objectifs de maintenance en 5 points :

- Garantir les fonctions de l'usine (disponibilité, qualité des produits, fiabilité, etc.) ;
- Assurer la sûreté de l'usine et de son environnement ;
- Veiller à ce que le bien (usine/atelier) atteigne sa durée de vie ;
- Assurer la rentabilité économique de la maintenance ;
- Garantir l'utilisation efficace des ressources.

La multitude des objectifs attribués à la maintenance traduit la complexité du contexte dans lequel elle évolue. Seule la mise en œuvre d'axes de progrès et de critères d'évaluation – management de la maintenance - permettra d'ancrer les pratiques de maintenance dans cet environnement évolutif.

1.3.Le management de la maintenance

La norme (NF-EN-13306, 2010) définit **le management de la maintenance** comme « toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités en matière de maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des activités de maintenance et des aspects économiques ». Nous retrouvons dans cette définition les principaux éléments structurant le management de la maintenance. A présent, identifions et appréhendons les relations entre ces différents éléments.

Les objectifs de maintenance, selon la définition, sont déterminés par le management de la maintenance. Pour (Pintelon and Parodi-herz, 2008), le management de la maintenance doit « maximiser la disponibilité et la fiabilité des équipements pour qu'ils produisent la quantité de produits souhaité, avec les spécifications de qualité requises et dans les délais impartis. Ces objectifs doivent être atteint d'une manière rentable et en respectant les normes environnementales et sécuritaires ». Le management de la maintenance est avant tout un équilibre à trouver entre les différents objectifs associés à la maintenance. Selon les spécificités des entreprises, un poids plus ou moins important sera accordé à certains objectifs, et un ordre de priorité sera établi. Définir les objectifs de maintenance est une étape cruciale puisque les critères à maximiser ou à minimiser pour optimiser la maintenance seront déterminés en fonction des objectifs retenus. Malheureusement, aucune méthode précise permet de déterminer les critères à privilégier ou à optimiser dans un contexte donné (Van Horenbeek et al., 2010). La littérature nous permet néanmoins d'identifier deux recommandations. (Parida and Kumar, 2006) (Swanson, 2001).

- Les objectifs de maintenance découlent de la stratégie globale de l'entreprise ;
- Les objectifs de maintenance doivent être alignés avec ceux de la production.

Une fois les objectifs attribués à la maintenance, le management de la maintenance doit définir la stratégie de maintenance permettant d'atteindre ces objectifs.

La stratégie de maintenance est « la méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance » (NF-EN-13306, 2010). Elle traduit en actions les objectifs de la maintenance (Velmurugan and Dhingra, 2015). Plus généralement, le choix de la stratégie de maintenance impacte dans son ensemble le fonctionnement de la maintenance. (Raouf et al., 2006) identifient dix éléments de décision permettant de définir la stratégie de maintenance. Avant tout, la stratégie de maintenance définit les actions de maintenance à

effectuer, c'est-à-dire le type de maintenance à réaliser et à quelle fréquence. Cela représente une quantité de travail équivalente à la charge de travail en maintenance. Les ressources permettant de réaliser les activités de maintenance au sein d'une entreprise représentent la capacité de maintenance de l'entreprise. Elles peuvent être d'ordre techniques (outils spécifiques, logiciels de GMAO, etc.) ou humaines (main d'œuvre disponible, compétences requises) (Haroun and Duffuaa, 2009). Pour garantir une mise en œuvre efficace de la stratégie de maintenance retenue, le management de la maintenance devra disposer d'un rapport charge/capacité de maintenance adéquat. La figure 10 illustre les liens entre la stratégie de maintenance et la capacité de maintenance.

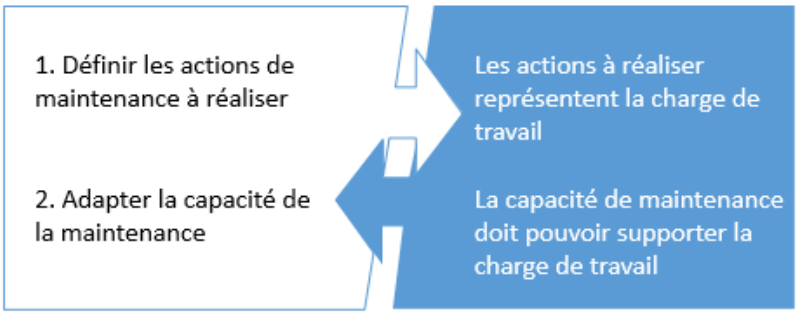


Figure 10: Liens de causalité entre la stratégie et la capacité de maintenance

Pour mettre en œuvre la stratégie de maintenance, le management de la maintenance doit répartir les ressources (main d'œuvre, matériels, etc.) et définir les responsabilités de chacun. Cela revient à déterminer l'organisation de la maintenance. Tout comme les objectifs et la stratégie de maintenance, l'organisation de la maintenance varie selon les structures. Pour (Schermerhorn, 2007) l'organisation dans son ensemble doit être vue comme une entité dynamique qui évolue continuellement pour répondre aux changements liés aux technologies, aux procédés et à son environnement. Par conséquent, aucune méthodologie universellement acceptée conduit à l'organisation optimale (Dunn, 2006). Nous identifierons cependant trois facteurs déterminants pour définir l'organisation de maintenance (Haroun and Duffuaa, 2009):

- La capacité de la maintenance ;
- Le niveau d'internalisation/externalisation ;
- Le niveau de centralisation/décentralisation.

La capacité de la maintenance est le point de départ pour dimensionner l'organisation de maintenance au plus près de la réalité. Les deux autres facteurs permettent d'adapter au plus juste la capacité de maintenance pour qu'elle puisse supporter la charge de travail.

Pour augmenter la capacité de la maintenance, les deux possibilités sont soit d'embaucher directement de la main d'œuvre, soit de solliciter des entreprises extérieures (« l'acte de sous-traitance »). Le choix entre ces deux options dépend essentiellement des moyens financiers et des enjeux stratégiques de l'entreprise. Ci-dessous, les principaux critères de sélection à considérer pour internaliser ou externaliser les compétences considérées (Haroun and Duffuaa, 2009) :

- La disponibilité et la dépendance vis-à-vis de la compétence ;
- Le niveau de confidentialité ;
- L'impact à long terme sur le niveau d'expertise du personnel ;
- La vision à court et long termes des dépenses en maintenance (budget maintenance).

La décision de centraliser (certains utilisent le terme mutualiser) ou décentraliser certaines fonctions appartient à chaque entreprise. Elle dépend majoritairement de la culture interne et de ses spécificités (taille de l'entreprise, charge de maintenance, compétences requises, etc.). Le tableau 2 regroupe les principaux avantages et inconvénients relatifs à la mutualisation de certaines activités (Duffuaa and Raouf, 2015) **:**

Avantages	Inconvénients
Offre une plus grande flexibilité quant à l'utilisation des ressources notamment celle de la main d'œuvre hautement qualifiée	Les temps de trajets pour intervenir et les coûts de déplacement augmentent
Permet de former plus efficacement le personnel	L'accompagnement et le suivi des équipes sur le terrain est plus difficile
Permet l'achat d'équipements modernes complexes	Les équipes ont une moins bonne connaissance des équipements et de leurs contexte

Tableau 2: Principaux avantages et inconvénients de centraliser des ressources selon (Duffuaa and Raouf, 2015)

Ces trois points permettent d'adapter la capacité de maintenance et contribuent à définir l'organisation de la maintenance. Pour aboutir à une définition complète de l'organisation de la maintenance, il importe de détailler comment toutes ces ressources vont travailler ensemble en définissant le rôle et les responsabilités de chacun. Selon (Haroun and Duffuaa, 2009) une organisation est caractérisée par plusieurs éléments (la répartition des tâches, un flux de travail, des relations hiérarchiques, ainsi que des canaux de communication) qui relient le travail de plusieurs individus ou groupes de personnes. En énumérant ces éléments, il semble difficile d'identifier une organisation type pour la maintenance, pouvant répondre aux attentes et spécificités de chaque entreprise. Selon (Bonde and Fulzele, 2013) il n'existe pas de structure

organisationnelle idéale qui puisse répondre à tous les besoins. Pour surmonter cette écueil, il est préférable de déterminer un processus générique sur lequel chaque entreprise s'appuiera pour adapter sa propre organisation (Crespo Marquez and Gupta, 2005). Un processus peut s'assimiler à un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie (AFNOR, 2002). La littérature recèle plusieurs définitions et représentations du processus de maintenance. La norme française (PR-NF-EN-17007, 2016) définit le processus global de la maintenance à l'aide de trois grands processus :

- Un processus de management, qui permet le pilotage de la maintenance afin d'atteindre les objectifs fixés par la direction de l'entreprise ;
- Un processus de réalisation, qui contribue directement à atteindre les résultats espérés ;
- Un processus de support, qui permet aux autres processus de bien fonctionner en assurant la disponibilité des ressources nécessaires.

De son côté, (Mikler, 2015) détaille trois processus pour définir celui de la maintenance :

- Un processus de management de la maintenance, qui occupe le même rôle que celui définit par (PR-NF-EN-17007, 2016) ;
- Un processus de fiabilité, considéré dans ce cadre comme un processus d'amélioration continue visant à développer le programme de maintenance adapté aux besoins de la production ;
- Un processus d'exécution de la maintenance décomposé en quatre étapes (préparation, ordonnancement, exécution et contrôle).

La figure 11 représente le processus de la maintenance vu par (Mikler, 2015). Elle détaille les relations entre les trois sous-processus et souligne les liens entre le processus de production et celui de maintenance. La maintenance étant une fonction support à la production, Mikler décrit ici comment la maintenance est organisée pour s'adapter aux besoins de la production. Le management de la maintenance se base ainsi sur la performance du processus de production (niveau de disponibilité, capacité de production, etc.) pour définir ou adapter sa stratégie de maintenance. Celle-ci impactera d'une part, l'exécution des opérations de maintenance (en définissant les compétences internalisées et/ou mutualisées) et d'autre part, la fiabilité en fixant notamment les niveaux de services (en termes de disponibilité, et de sûreté de fonctionnement des équipements) attendus. Le management de la maintenance adapte également sa stratégie de maintenance en considérant la performance de ces deux processus. Vis-à-vis de la production, le processus d'exécution doit coordonner les opérations de maintenance pour éviter d'entraver, le moins possible, les activités de production. L'étape de préparation doit s'assurer notamment

de la mise à disposition de l'équipement par la production pour faciliter l'intervention des équipes de maintenance. Le processus de fiabilité - quant à lui - tient compte des conditions d'exploitation et de la criticité[3] pour concevoir le programme de maintenance qui définit les actions de maintenance préventive à réaliser. Les compte rendus d'intervention effectués une fois les opérations de maintenance réalisées permettront d'ajuster le programme de maintenance.

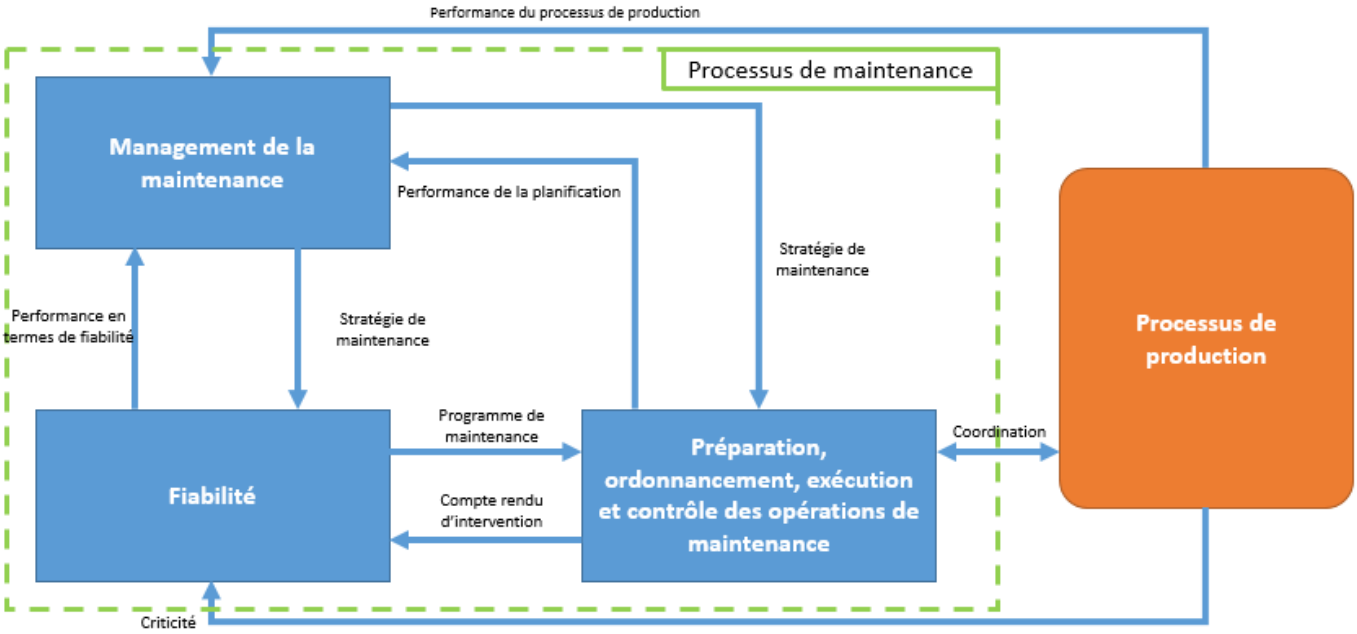


Figure 11: Représentation du Processus de maintenance selon (Mikler, 2015)

Pour clore la revue des processus maintenance, nous présenterons celui proposé par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) qui identifie quatre étapes clés :

- Identification ;
- Préparation ;
- Ordonnancement ;
- Réalisation.

La première étape consiste à déterminer, en fonction des objectifs définis pour la maintenance, « les bonnes actions à réaliser au bon moment ». Elle identifie et contrôle les défaillances susceptibles d'affecter la capacité des équipements à remplir leur fonction au niveau de performance requis. La deuxième étape développe les procédures et les ordres de travaux à suivre pour exécuter les opérations de maintenance identifiées. Cela suppose d'identifier les

[3] La criticité est une notion centrale pour définir les plans de maintenance préventive. Nous l'aborderons plus en détail dans la partie sur les modèles d'optimisation de la maintenance.

compétences nécessaires, les consignes de sécurité à respecter ainsi que les instructions à suivre. L'étape d'ordonnancement évalue la disponibilité des ressources nécessaires pour réaliser les opérations et propose un planning pour les réaliser. Elle consiste à « organiser dans le temps la réalisation des interventions prévues, compte tenu des contraintes d'enchaînement et des contraintes de ressources requises » (AFNOR, 2013). Enfin, l'étape de réalisation s'assure que les opérations programmées sont bien réalisées dans les temps estimés et avec efficience. Ces quatre étapes forment selon (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) le cycle de la maintenance (« *maintenance loop* ») (figure 12).



Figure 12: Représentation du processus de maintenance selon (Campbell and Reyes-Picknell, 1995)

Ces trois représentations du processus de la maintenance permettent de clarifier les interactions entre les différents termes présentés jusqu'ici et d'enrichir la compréhension du fonctionnement de la maintenance. Bien que les découpages en sous-processus ou étapes diffèrent selon les définitions proposées, ils recouvrent les différents aspects de la maintenance (figure 13). Le second point à noter - concernant ces modélisations du processus de maintenance - est que tous intègrent une démarche d'amélioration continue. Le plus frappant semble la modélisation de (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) *où le parallèle avec les quatre étapes de la roue de Deming* (Deming, 1986) *– Plan/Do/Check/Act – est criant. Cette similitude traduit la volonté et le besoin d'adapter en permanence les activités et l'organisation de la maintenance à un contexte dynamique et complexe.*

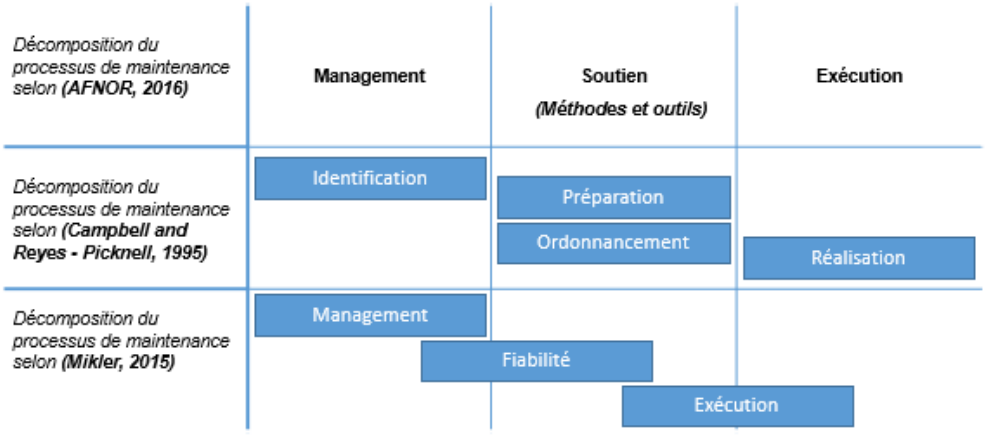


Figure 13: Equivalence entre les différentes décomposition du processus de maintenance

Afin d'identifier si la stratégie et l'organisation de maintenance retenues permettent de répondre aux objectifs, il importe de mesurer l'activité de la maintenance. Ce paramètre passe par le choix et la mise en place d'indicateurs de performance de la maintenance qui s'inscrivent dans la déclinaison d'un processus.

1.4.La mesure de la performance de la maintenance

Pour mesurer la performance de la maintenance, nous définissons dans un premier temps uniquement la performance à travers les travaux de thèse de (Maranzana, 2009) qui présente les principaux concepts et définitions liés à la performance. Parmi les définitions proposées, nous retenons pour la suite du manuscrit celle de (Gibert, 1980) qui positionne la performance au centre du triangle regroupant trois notions : efficience, efficacité et pertinence. Ces notions peuvent se définir dans le triptyque : objectifs, moyens, résultats (figure 14).

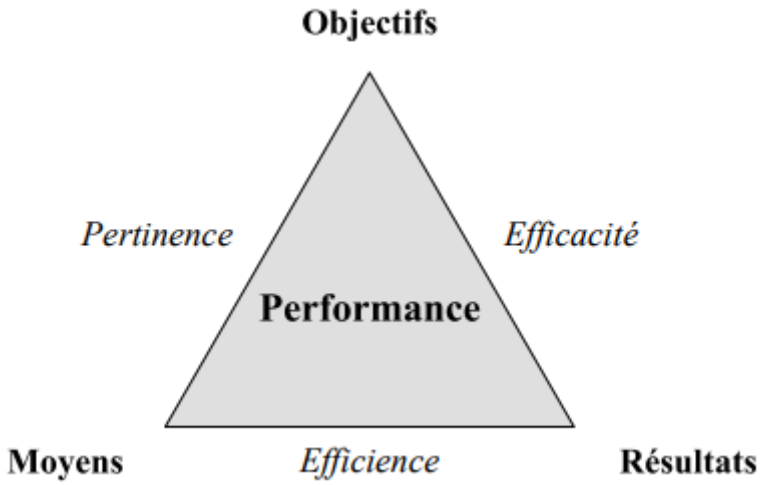


Figure 14: Triangle de la performance (Gibert, 1980)

- L'axe objectifs-résultats : définit l'*efficacité* comme relative à l'utilisation des moyens pour obtenir des résultats donnés dans le cadre d'objectifs fixés ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs ;
- L'axe résultats-moyens : définit l'*efficience* comme le rapport entre l'effort produit et les moyens totaux déployés dans une activité ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs au moindre coût ;
- L'axe moyens-objectifs : définit la *pertinence* comme le rapport entre les moyens déployés et les objectifs à atteindre ; c'est-à-dire la bonne allocation des ressources.

Sans aucune mesure de la performance de la maintenance, il est difficile de contrôler et d'améliorer le processus maintenance (Parida and Chattopadhyay, 2007). Ce constat se vérifie également pour justifier des investissements futurs dans la maintenance, et s'assurer que les actions et la stratégie mises en œuvre sont alignées avec les objectifs (Lynch and Cross, 1991). Cependant, en tant que fonction support du processus de production, les mérites et les défauts du service rendu de la maintenance se perçoivent plus tard. Ce point freine toute quantification

des effets et mesure de performance Il est donc difficile d'en quantifier rapidement les effets et de mesurer sa performance (Shahin, 2014). Pour y parvenir, il importe de mettre en place et d'utiliser un système de mesure de la performance approprié (Tsang, 2002).

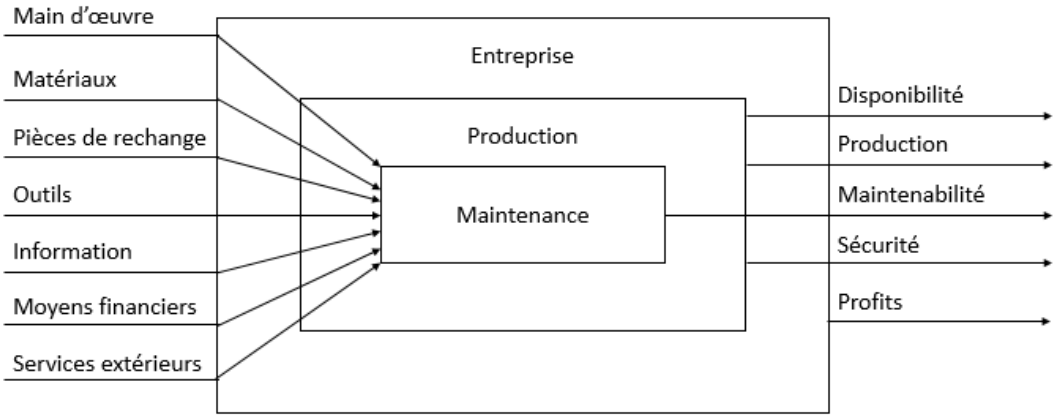


Figure 15: Modélisation "entrées-sorties" de la maintenance (Visser, 1998)

Il existe dans la littérature plusieurs définitions pour les indicateurs de maintenance. Nous retiendrons celle proposée par (Wireman, 1998) qui définit **les indicateurs de performance de la maintenance** comme « un ensemble de mesures utilisées pour quantifier l'impact de la maintenance sur la performance globale de l'entreprise ». Lorsqu'il s'agit de mesurer la performance de la maintenance, il est judicieux d'utiliser le modèle proposé par (Visser, 1998), qui représente la fonction maintenance en un processus de transformation encapsulé dans un système global qu'est l'entreprise. Les données d'entrée représentent les ressources utilisées et les données de sortie, les différents résultats potentiellement impactés par la maintenance (figure 15). Ainsi, la performance de la maintenance peut s'exprimer sous la forme de ratios entre les données de sortie et d'entrée. A titre d'exemple, le tableau ci-dessous (tableau 3) regroupe les principaux indicateurs de performance de la maintenance utilisés (Rødseth et al., 2015).

No.	Indicateur	Description de l'indicateur
1	$\frac{Coût\ total\ de\ maintenance}{Coût\ de\ remplacement\ des\ actifs\ industriels}$	Décrit si l'entreprise a des coûts de maintenance trop élevés.
2	$\frac{Valeur\ moyenne\ de\ l'inventaire\ des\ pièces\ détachées}{Valeur\ de\ remmplacement\ des\ actifs\ industriels}$	Est utilisé pour évaluer si l'inventaire des pièces détachées est trop important
3	$\frac{Temps\ passé\ sur\ des\ opérations\ de\ maintenance\ préventive}{Temps\ total\ de\ maintenance}$	Indique la part de maintenance préventive

4	$\frac{Coût\ global\ de\ la\ maintenance}{Chiffre\ d'affaire\ de\ l'entreprise}$	Décrit le coût de maintenance comparé au chiffre d'affaire de l'entreprise
5	$\frac{Temps\ passé\ sur\ des\ opérations\ correctives\ critiques}{Temps\ total\ de\ maintenance}$	Indique la part de temps de maintenance effectuée sur des actions correctives critiques
6	$\frac{Temps\ passé\ sur\ des\ opérations\ préparées}{Temps\ total\ de\ maintenance}$	Indique la proportion de temps passé par les équipes de maintenance sur des opérations préparées
7	$\frac{Temps\ de\ fonctionnement\ effectif}{Temps\ de\ fonctionnement\ requis}$	Cet indicateur montre la disponibilité opérationnelle de l'outil de production
8	Taux de rendement global – T.R.G.	$TRG = Taux\ de\ disponibilité * Taux\ de\ performance * Taux\ de\ qualité$

Tableau 3: Liste des principaux indicateurs utilisés en maintenance selon Rødseth et al. 2015

Bien qu'une multitude d'indicateurs existe pour mesurer la performance de la maintenance, leur mise en œuvre dans un contexte industriel reste extrêmement compliquée. (Shahin, 2014) souligne le manque de ressources (temps et outils adaptés) des managers pour produire ces indicateurs. Il précise également que la qualité des indicateurs dépend fortement de la précision des données analysées et de la fréquence à laquelle elles sont remontées. L'autre obstacle rencontré concerne le manque d'approche méthodologique pour aider les entreprises à choisir les indicateurs adaptés à leur situation (Muchiri et al., 2011). En effet, l'exhaustivité d'indicateurs ne garantit pas une retranscription fidèle de la performance de la maintenance. Selon le contexte et les objectifs de l'entreprise, certains indicateurs seront plus pertinents que d'autres. Nous présentons ici les principales caractéristiques et les regroupements d'indicateurs présents dans la littérature.

(Arts et al., 1998) utilisent un horizon temporel pour classer les indicateurs. Ils distinguent trois niveaux : stratégique (long terme), tactique (moyen terme) et opérationnel (court terme). Nous pouvons également associer un découpage organisationnel à ces trois niveaux : le niveau stratégique. Ce dernier est associé au top management de l'entreprise (il fixe les objectifs à long termes) ; le niveau tactique au management intermédiaire ; et le niveau opérationnel aux responsables d'équipes. Pour chaque niveau de management, (Parida and Chattopadhyay, 2007) identifient des indicateurs multicritères parmi lesquels figurent le coût/financement, la satisfaction des employés, la sécurité, les équipements. De son côté, (Shahin, 2014) regroupe les indicateurs de maintenance selon deux types : économiques et techniques. A ces deux catégories, la norme européenne (NF-EN-15341, 2007a) en ajoute une troisième : celle des indicateurs organisationnels. (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) classent les indicateurs de

performance de la maintenance en fonction de leur objectif et proposent trois catégories : ceux qui mesurent la performance des équipements, ceux qui mesurent la performance en termes de coûts, et ceux qui mesurent la performance des processus. Citons enfin les travaux de thèse de (Dwight, 1999) qui identifient et formalisent le fait qu'une variation du délai plus ou moins importante existe entre une action et son résultat. Il propose alors deux types d'indicateurs : les « leading » et les « lagging ». Les indicateurs « *leading* » permettent de vérifier que les actions mises en œuvres sont bien exécutées et contribuent à atteindre les résultats attendus. Les indicateurs « *lagging* », quant à eux, permettent de vérifier si les objectifs sont atteints.

Ces différentes classifications facilitent la compréhension du rôle des indicateurs pour le management de la maintenance, et contribuent à identifier les indicateurs les plus adaptés à une situation donnée.

1.5.Synthèse sur la maintenance industrielle

Nous avons axé cette première partie de l'état de l'art sur la compréhension de la maintenance en tant que telle. A partir de la définition proposée par la norme (NF-EN-13306, 2010), nous avons défini avec précisions les principaux termes associés à la maintenance. Cette analyse a montré à la fois la diversité des activités de maintenance et la multitude des contraintes qui l'impactent. Ces deux aspects rendent la maintenance extrêmement complexe. La figure ci-dessous (figure 16), extraite des travaux de (Pintelon and Parodi-herz, 2015), résume le contexte général de la maintenance : au centre, l'un des principaux objectifs associés à la maintenance ; en gris, les différentes natures des activités de maintenance ; et à l'extérieur, les contraintes.

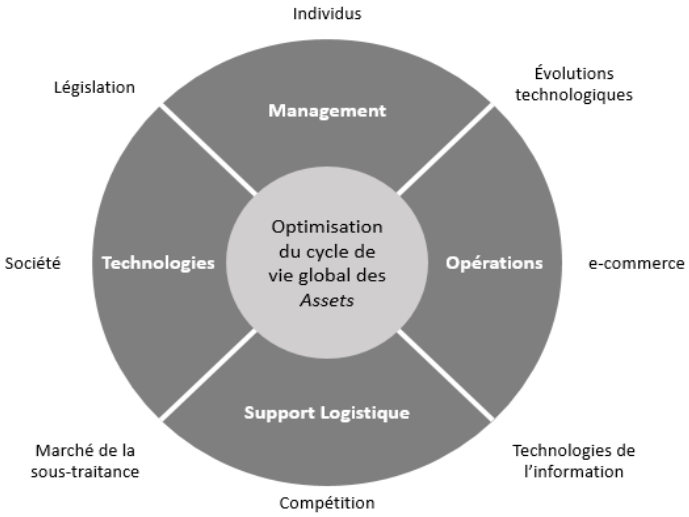


Figure 16: Modélisation du contexte de la maintenance selon (Pintelon and Parodi-herz, 2015)

Parmi les termes analysés, nous en retiendrons un en particulier : le management de la maintenance. Ce concept permet de coordonner et de mettre en œuvre toutes les activités de maintenance. Nous synthétisons à travers la figure 17 les recommandations issues de l'analyse de l'état de l'art à ce sujet.

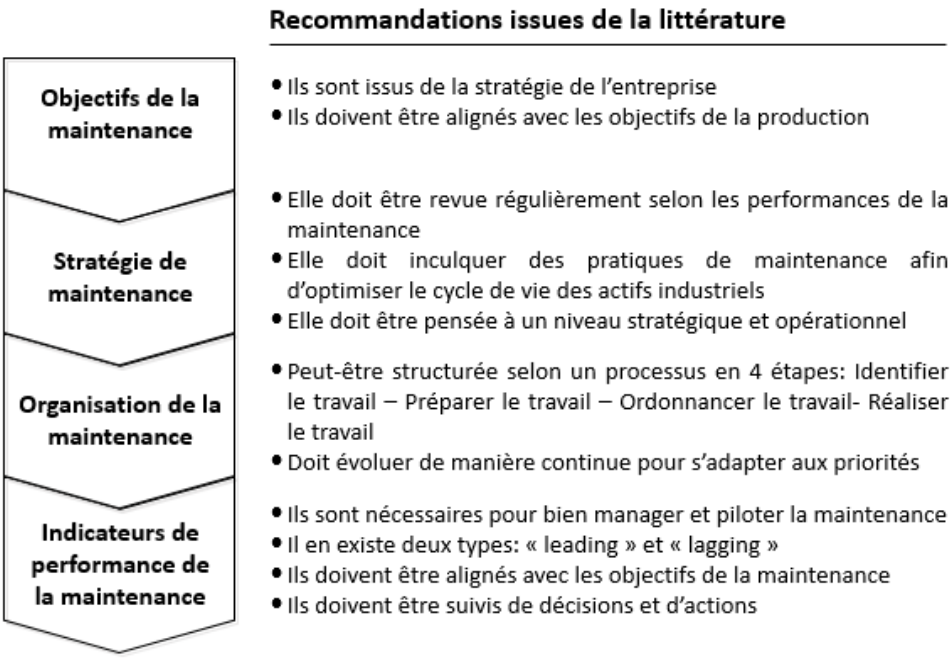


Figure 17: Recommandations issues de la littérature concernant les principales composantes du management de la maintenance

Après avoir cerné le fonctionnement et les enjeux de la maintenance, intéressons-nous – dès lors - aux solutions permettant de l'optimiser.

2. Les modèles d'optimisation de la maintenance

La maintenance occupe aujourd'hui un rôle de plus en plus important au sein des entreprises. Elle doit être considérée comme une véritable opportunité d'investissement à optimiser, et non comme un coût à minimiser (Van Horenbeek et al., 2010). Dans cette partie nous définirons dans un premier temps ce que signifie optimiser la maintenance, puis nous présenterons les principaux modèles et approches d'optimisation de la maintenance. La thèse devant répondre à un besoin industriel, nous porterons une attention particulière sur les éléments et critères facilitant la mise en œuvre de ces modèles dans un contexte industriel.

2.1.L'optimisation de la maintenance : définition et modèles

Le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales définit le terme optimiser comme « donner à quelque chose les meilleures conditions d'utilisation, de fonctionnement, et de rendement ». Cette définition suppose de connaître les conditions optimales pour les attribuer ensuite à ce que nous souhaitons optimiser. Par conséquent, optimiser nécessite de déterminer initialement les meilleures conditions.

La littérature scientifique possède de nombreux modèles d'optimisation de la maintenance. Plusieurs articles présentent une analyse des modèles existants, et proposent différentes classifications. En 1996 (Dekker, 1996) a passé en revue cent douze articles de recherches sur différents modèles d'optimisation de la maintenance ; et plus récemment, (de Jonge and Scarf, 2019) analysaient plus de deux cents écrits scientifiques à ce sujet parus entre les années 2001 et 2018. Ces différentes analyses présentent les principaux modèles d'optimisation de la maintenance et les regroupent généralement en fonction de leurs caractéristiques. Pour la suite du mémoire, nous retiendrons parmi les classifications proposées celles de (Sharma et al., 2011) qui distinguent deux types de modèles d'optimisation pour la maintenance :

- Les modèles dits *qualitatifs* qui englobent des techniques comme TPM[4] ou RCM[5] ;
- Les modèles dits *quantitatifs* qui intègrent des modèles stochastiques/déterministes comme les chaînes de Markov ou les modèles Bayésiens.

Les modèles quantitatifs abordent la question de l'optimisation de la maintenance avec une vision mathématique du problème. Dans ce cas, l'optimisation consiste à minimiser ou maximiser - selon certains critères - une fonction objective (Wang, 2002). (de Jonge and Scarf, 2019) partagent cette vision et définissent l'optimisation de la maintenance comme « l'élaboration et l'analyse de modèles mathématiques visant à améliorer ou à optimiser les politiques de maintenance ». Ces définitions révèlent les deux principales caractéristiques d'un modèle d'optimisation : d'un côté la modélisation du comportement de la maintenance via une ou plusieurs fonctions objectives (purement mathématiques), de l'autre, les critères d'optimisation pris en compte. Ainsi, selon les choix effectués vis-à-vis de ces deux parties, nous obtenons une multitude de modèles d'optimisation de la maintenance.

Les critères d'optimisation de la maintenance proviennent des objectifs associés à la maintenance qu'ils caractérisent. A travers une analyse de 150 articles scientifiques, (Syan and Ramsoobag, 2019) en recensent une centaine et identifient les 4 critères les plus usités dans les modèles d'optimisation : le coût, la disponibilité, la fiabilité et la sécurité. Le tableau 4 regroupe les principaux critères d'optimisation de la maintenance identifiés dans la littérature (Van Horenbeek et al., 2010; Sharma et al., 2011).

[4] TPM : Total Productive Maintenance (Maintenance productive totale) nous l'aborderons plus den détails dans la partie suivante.

[5] RCM : Reliability Centered Maintenance (Maintenance centrée sur la fiabilité) sera également présentée dans la partie suivante.

Coûts de maintenance	Disponibilité
Qualité de la maintenance	Fiabilité
Gestion du personnel	Maintenabilité
Inventaire des pièces détachées	Impacts sur l'environnement
Efficacité globale des équipements	Sécurité
Nombre d'interventions de maintenance	Logistique
Décisions de remplacement des équipements	Quantité en sortie de production
Optimisation du cycle de vie	Qualité de la sortie en production

Tableau 4: Liste générique des critères d'optimisation pour la maintenance

La maintenance doit généralement trouver un équilibre ou un compromis entre plusieurs objectifs. C'est pourquoi les modèles d'optimisation de la maintenance sont souvent des modèles multi-objectifs (Tian et al., 2012). Nous retrouvons dans ces modèles des critères d'optimisation et des contraintes. Ils permettent selon une situation donnée (selon certains critères d'optimisation et selon certaines contraintes) d'identifier les meilleures conditions d'utilisation. D'une certaine manière, il s'agit de véritables outils d'aide à la décision. D'après (Syan and Ramsoobag, 2019), la majorité des modèles d'optimisation cherchent à identifier soit l'intervalle de temps entre chaque opération de maintenance, soit le type de maintenance à effectuer. Ajoutons à cela trois autres grandes applications des modèles d'optimisation de la maintenance.

La première application consiste à identifier les meilleurs choix de conception en vue d'optimiser la maintenance. Ces travaux de recherche émanent du concept général ***Design for X - DFX (***concevoir pour X) qui consiste à intégrer, dès la phase de conception, plusieurs contraintes en vue d'améliorer une propriété (X) de l'équipement (Kuo et al., 2001). Le principe de *Design for Maintenance - DFM* (concevoir pour la maintenance) permet de considérer les liens étroits existants entre la maintenance et la conception, pour assurer le fonctionnement du système avec les dépenses de coût sur son cycle de vie les plus optimales (Adjoul, 2019). Dans ce registre, nous citerons les travaux de (Adjoul et al., 2019) qui présentent un modèle d'optimisation de la maintenance inspiré du concept DFM. Le modèle cherche à maximiser la fiabilité de l'équipement tout en limitant le coût de maintenance sur son cycle de vie. Pour cela il utilise deux algorithmes génétiques qui guideront les choix de conception selon quatre critères : la fiabilité des composants, le niveau de redondance de certains équipements, la détection de panne intégrée des composants (intégration de capteurs) et enfin la maintenabilité des composants (accessibilité).

La deuxième grande application des modèles d'optimisation de la maintenance se situe dans la partie « soutien » du processus de maintenance. Les modèles identifient le niveau de stocks « idéal » des pièces détachées contribuant à optimiser la maintenance. La gestion des pièces

détachées devient parfois un enjeu majeur. D'un côté, si les pièces détachées nécessaires pour réparer un équipement sont manquantes, la maintenance ne pourra être effectuée et l'équipement restera indisponible ; ce qui affectera la performance globale de la production et entraînera une augmentation des risques industriels. De l'autre côté, des stocks surdimensionnés impliquent des dépenses conséquentes. (Louit et al., 2011) présentent plusieurs modèles pour déterminer le stock idéal de pièces détachées qui maximisera la fiabilité. Plus récemment, (Liu et al., 2020) ont proposé un modèle mathématique qui détermine simultanément la taille idéale du stock tampon et l'intervalle de temps associé entre les opérations de maintenance.

Enfin, la dernière application des modèles d'optimisation de la maintenance que nous identifions consiste à définir la meilleure période pour remplacer un équipement. Nous retrouvons dans la littérature plusieurs modèles mathématiques permettant de définir la période idéale de remplacement d'un équipement. Les principales différences concernent la méthode de modélisation des coûts de maintenance (Dhillon, 2017). Pour modéliser la maintenance, trois décisions influencent les modèles d'optimisation de la maintenance (Van Horenbeek et al., 2010). Tout d'abord, le choix des techniques d'optimisation utilisées. Les plus importantes sont : les optimisations dites continues ou discrètes, statiques ou dynamiques, contraintes ou non contraintes, et mono-objectif ou multi-objectif (Pintelon and Van Puyvelde, 2006). Ensuite, nous retrouvons le choix de la modélisation du processus de dégradation des composants. Une des manières les plus simple pour modéliser l'apparition des pannes est d'utiliser des lois de probabilité de défaillance telles que la loi de Weibull ou la loi exponentielle (Pintelon and Van Puyvelde, 2006). Une autre façon pour modéliser la dégradation des composants consiste à utiliser les chaînes de Markov (Marais and Saleh, 2009). Enfin, la détermination des hypothèses réalisées pour modéliser la maintenance. Il s'agit notamment du degré d'efficacité avec lequel les interventions de maintenance sont réalisées (parfait, imparfait, minime ou pire), et le temps nécessaire pour les réaliser. Beaucoup de modèles d'optimisation de la maintenance supposent que le temps d'intervention peut être négligeable (Pham and Wang, 1996). Une autre hypothèse impacte fortement la modélisation de la maintenance : la configuration des systèmes étudiés. (de Jonge and Scarf, 2019) définissent la notion de composant (ou unité) comme une partie d'un système, soumise à des interventions de maintenance et qui ne peut être sous-divisée. A partir de cette définition nous pouvons décrire les configurations des systèmes, dont les principales sont : simple-composant, multi-composants, série et parallèle.

En résumé, les modèles quantitatifs d'optimisation de la maintenance peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision. Ils définissent selon certains critères les meilleurs choix possibles pour les différents aspects de la maintenance sans en optimiser le processus global.

Ils contribuent ainsi à optimiser la maintenance. Le cycle de vie d'un équipement et du processus simplifié de la maintenance proposé par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) représente les principales décisions impactant la maintenance (figure 18).

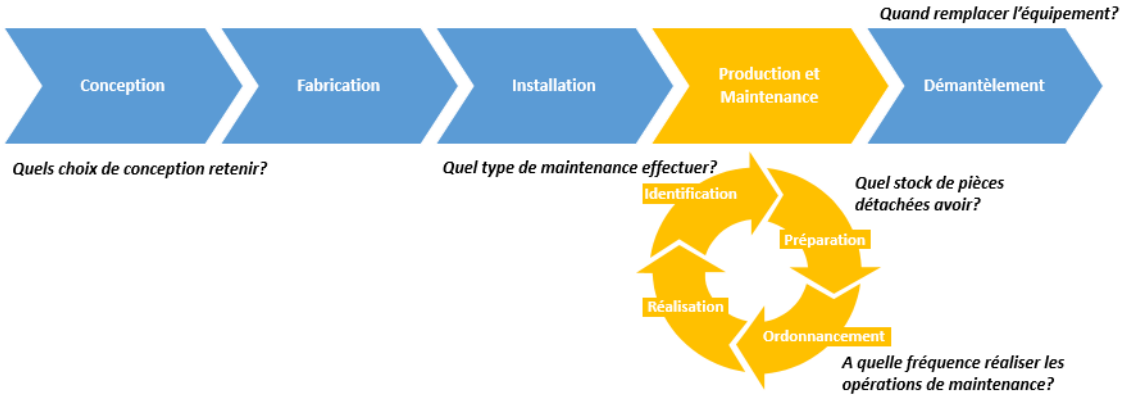


Figure 18: Les principales décisions impactant la maintenance

Les résultats issus des modèles d'optimisation dits quantitatifs et les décisions qui en découlent sont influencés par de nombreux paramètres comme les critères d'optimisation retenus, et les choix de modélisation de la maintenance. Dans un article de recherche, (Van Horenbeek et al., 2010) passent en revue la plupart des modèles d'optimisation de la maintenance existants et distinguent onze catégories d'éléments influençant les modèles d'optimisation de la maintenance. Cette catégorisation identifie les éléments cités précédemment, et soulève l'importance de la qualité des données à travers deux catégories :

- La catégorie « sources de données » qui précise la diversité du type de données collectées (données de défaillances, de coûts ou de fonctionnement) ;
- La catégorie « système d'information » qui caractérise l'exhaustivité des données présentes dans les systèmes d'information.

Ces éléments importent d'autant plus quand nous cherchons à appliquer ces modèles à des cas concrets, issus de l'industrie. En effet, les trois études de (Dekker, 1996; de Jonge and Scarf, 2019; Sharma et al., 2011) ont analysé la plupart des modèles d'optimisation de la maintenance présents dans la littérature au cours des trente dernières années et parviennent aux mêmes conclusions :

- Les modèles d'optimisation de la maintenance s'inspirent de solutions réelles mais seul un petit nombre d'entre eux s'appliquent à des cas concrets ;
- La plupart des modèles ne précisent pas les conditions préalables à l'utilisation de leurs modèles dans la pratique ;

- Les responsables et managers de la maintenance ignorent quel modèle d'optimisation de la maintenance - parmi les modèles disponibles - convient le mieux à leur situation ;
- Les responsables et managers de la maintenance manquent de temps et parfois de connaissance pour développer eux-mêmes un modèle d'optimisation adapté à leur besoin ;
- Les données nécessaires pour les modèles d'optimisation de la maintenance sont souvent, pas ou très peu disponibles dans l'industrie.

Au regard du contexte industriel de cette thèse, ces constats semblent disqualifier - de prime abord - les modèles d'optimisation de la maintenance dits quantitatifs. Intéressons-nous à présent aux modèles dits qualitatifs. Pour les différencier des précédents modèles d'optimisation de la maintenance « dits quantitatifs », nous utiliserons dans la suite du manuscrit le terme de « concepts de maintenance » proposé par (Van Horenbeek et al., 2010).

2.2.Les principaux concepts de maintenance

(Van Horenbeek et al., 2010) définit un concept de maintenance comme « un ensemble d'actions et de politiques de maintenance ainsi qu'une structure générale d'aide à la décision dans laquelle elles sont préparées et exécutées ». Cette section présente les principaux concepts de maintenance.

- **Maintenance basée sur la fiabilité**

La maintenance basée sur la fiabilité (*Reliability Centered Maintenance – RCM*) est une approche fonctionnelle et structurée permettant de définir les actions de maintenance préventive à mettre en œuvre pour améliorer la fiabilité des installations industrielles. La figure 19 représente les principales étapes de la méthode RCM.

La méthode RCM débute par une interprétation et une définition des fonctions principales et secondaires du(des) système(s) technique(s) étudié(s) puis, recense les pannes potentielles de ces fonctions. Ensuite, les modes de défaillances et les causes associés à ces pannes sont déterminés et leurs effets identifiés (Nowlan and Heap, 1978). Ces étapes constituent l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC). Au cœur de cette analyse nous retrouvons une notion clé : la criticité, qui caractérise le risque. La criticité combine la sévérité des effets du mode de défaillance (gravité) et de son taux d'apparition (occurrence). La gravité d'un mode de défaillance se définie essentiellement selon les enjeux. La littérature nous offre plusieurs méthodologies permettant de définir la criticité des

équipements. Pour une étude plus approfondie de ces méthodologies, nous nous réfèrerons au travail de (Zwingelstein, 2015a) qui recense les principales méthodologies existantes et présente leurs caractéristiques. Une fois la criticité des équipements définie, elle est utilisée pour sélectionner les tâches de maintenance appropriées et leurs fréquences de réalisation. Ces tâches de maintenance sont mises en œuvre puis, après un certain temps, leur apport est évalué et les taches de maintenance sont modifiées en conséquence.

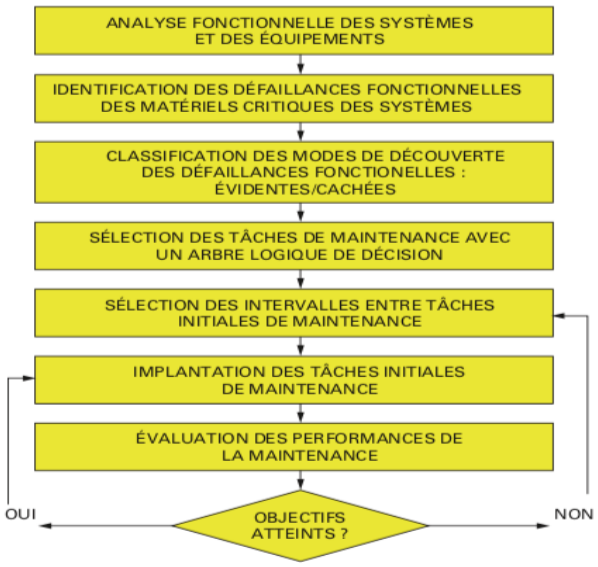


Figure 19: étapes fondamentales de la méthode RCM de base (Zwingelstein, 2015a)

La RCM, est très répandue dans l'industrie et continue encore aujourd'hui d'être déployée (Pintelon and Parodi-herz, 2015)*. Un des avantages majeur est qu'elle permet de collecter la connaissance tacite des entreprises (expériences et savoir faire des techniciens) à travers plusieurs étapes structurées* (Mungani and Visser, 2013).

- **Maintenance Productive Totale**

Contrairement à la RCM, qui est une approche fonctionnelle orientée vers les équipements, la Maintenance Productive Totale *(Total Productive Maintenance – TPM)* est davantage tournée vers l'organisation globale de l'entreprise. Elle repose sur deux principes originaires des entreprises japonaises : le Kanban (zéro stock) et le Just à Temps (*Just In Time - JIT*) (Nakajima, 1988). La TPM est une approche permettant d'améliorer en continue la performance de certaines activités industrielles, et tout particulièrement la maintenance. Pour y parvenir, elle utilise un outil très puissant : le Taux de Rendement Synthétique – TRS (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*) qui permet de mesurer l'utilisation efficace de la capacité de production. La force du TRS est qu'il intègre les fonctions liées à la qualité, la maintenance et la production

à travers les « *six big losses* » (les six sources de perte de performance) (Monchy and Vernier, 2010; Takahashi and Osada, 1990). La figure 20 illustre ce principe.

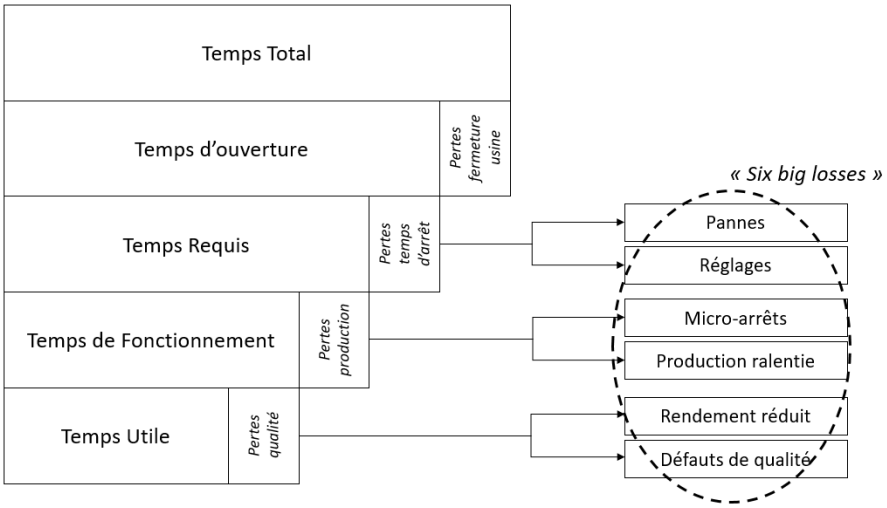


Figure 20: Les "six big losses" du Taux de Rendement Synthétique

(Nakajima, 1988) considéré comme le père de la TPM décrit le concept TPM en cinq points :

- La TPM cherche à obtenir l'utilisation la plus efficiente des équipements ;
- La TPM établit un programme de maintenance complet, comprenant la maintenance préventive et les actions d'amélioration pour le cycle de vie de l'équipement liées à la maintenance ;
- La TPM est mise en œuvre en équipe, et nécessite la participation des services d'ingénierie, d'exploitation et de maintenance ;
- La TPM implique chaque employé, du top management jusqu'au technicien dans l'atelier ;
- La TPM promeut et met en œuvre une maintenance productive axée sur des activités autonomes en petits groupes.

Un des principaux avantages de la TPM est qu'elle associe dans une démarche globale les fonctions de qualité, de maintenance et de production pour améliorer la satisfaction des clients (Monchy and Vernier, 2010). *En revanche, elle n'aborde en aucun cas la notion souvent critique de dépenses et de coûts.*

- **Maintenance Basée sur l'Entreprise**

La Maintenance Basée sur l'Entreprise (*Business Centred Maintenance – BCM*) est un concept développé par (Kelly, 1997) qui maximise la contribution de la maintenance à la rentabilité de l'entreprise. Le concept s'appuie dans un premier temps, sur un cadre pour identifier les objectifs de l'entreprise pour, dans un second temps, les traduire en des objectifs de

maintenance. Cela nécessite de nombreuses données telles que des données techniques, de production, de durée de vie des équipements, ou encore des données liées à la charge de travail (Waeyenbergh and Pintelon, 2002). La BCM utilise avant tout une approche pragmatique et structurée que nous pouvons détailler en dix 10 étapes (Sherwin, 2000) :

1) Définir les fonctions du système maintenance,
2) Notamment les objectifs, ce qui mène à
3) Définir la stratégie de maintenance qui est identifiée en
4) Anticipant la manière dont l'usine/la ligne de production sera exploitée ; ce qui permet de
5) Définir la charge de travail en maintenance, qui elle-même impacte
6) La structure des ressources, notamment la main d'œuvre ; puis
7) Construire autour de ces ressources le système de préparation et contrôle des opérations de maintenance.
8) Tous ces facteurs vont influencer les prises de décision ; et
9) Le suivi des activités de maintenance permet de s'assurer que la fonction maintenance se rapproche des objectifs ;
10) Un système de documentation, sous format papier ou informatisé, est indispensable et fondamental pour les opérations de l'ensemble du système de gestion de la maintenance.

Cette formalisation en dix étapes du concept de BCM met en jeu les principaux composants du management de la maintenance identifiés dans la première partie de l'état de l'art. De plus, nous retrouvons globalement le même séquencement que celui identifié dans cette même partie. A travers la BCM, Kelly formalise une approche s'appuyant sur un nombre important de données pour définir et mettre en œuvre les activités de maintenance qui contribuent vraiment à atteindre les objectifs de l'entreprise. Pour autant, comme le souligne (Sherwin, 2000) *le concept BCM reste relativement vague et peu détaillé ce qui en fait avant tout une philosophie générale plutôt qu'un véritable programme d'optimisation.*

- **<u>Les approches basées sur les Analyses de Coûts de Cycle de Vie</u>**

Le coût d'acquisition n'étant pas la seule dépense à prendre en compte lors du choix d'un équipement, les analyses de coûts de cycle de vie (*Life Cycle Cost Analysis – LCC Analysis*) répondent aux exigences de connaissance des coûts du système tout au long de son existence. Par exemple : le prix d'achat d'une automobile n'est que "la partie visible de l'iceberg" ; à cela s'ajoutent les dépenses liées à l'essence, l'entretien, les réparations, etc. (Dhillon, 1989). Le coût de cycle de vie, ou le coût global est défini par la norme française (NF-X60-010, 1984) comme "la somme des dépenses sur l'ensemble de la vie d'un produit pour un usage donné". Il existe dans la littérature plusieurs manières de le décomposer et de le représenter (Dhillon, 2017) ;

une des plus répandue est de distinguer les coûts d'investissement (*Capital Expenditure – CAPEX*) des coûts d'exploitation (*Operational Expenditure - OPEX*). La figure ci-dessous illustre cette distinction tout en affinant la décomposition des coûts (Márquez et al., 2009) :

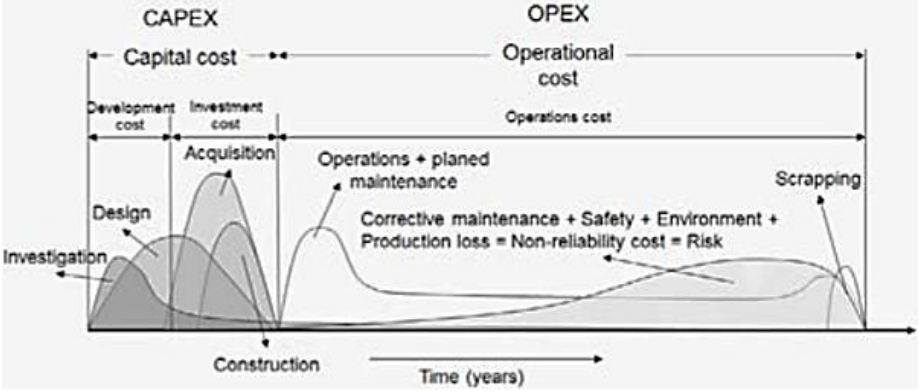


Figure 21: Analyse des coûts de cycle de vie (Marquez et al. , 2009)

Un des points notable est que, généralement, les coûts d'exploitation (l'aire sous la courbe sur la figure 21) - et plus particulièrement les coûts de maintenance - dépassent largement les coûts d'investissement. Dans ses travaux de thèse, (GLADE, 2005) analyse la répartition des coûts qui constituent le coût de cycle de vie de plusieurs équipements ou systèmes issus de différents secteurs industriels. Ainsi, pour une turbine à aubes les coûts d'exploitation représentent 67 % du coût global, pour un hélicoptère 45 % et, pour une centrale nucléaire 36 %. Ces chiffres concordent avec la représentation des coûts de cycle de vie de (Márquez et al., 2009) et soulignent l'importance des coûts de maintenance.

Nous retrouvons dans la littérature plusieurs approches ayant pour leitmotiv l'optimisation du coût total de maintenance sur l'ensemble du cycle de vie des équipements (Waeyenbergh and Pintelon, 2002). Parmi ces approches nous citerons celle dite « térotechnologique » proposée par (Parkes, 1970). Cette approche repose sur le partage des retours d'informations à chaque étape du cycle de vie de l'équipement. Ces retours alimentent la phase de conception et guident les nouveaux choix de conception pour optimiser le coût de cycle de vie de l'équipement.

Nous pouvons également citer une deuxième approche relativement proche de la térotechnologie : la gestion d'actifs industriels (*Industrial Asset Management*) définie par la norme (NF ISO 55000, 2014), comme « les activités coordonnées d'un organisme, dans le but de réaliser de la valeur à partir d'actifs ». Elle permet d'atteindre les objectifs de l'entreprise tout en assurant un équilibre entre les coûts (financiers, environnementaux et sociaux), les risques, la qualité de service et les performances liées aux actifs et ainsi, réaliser de la valeur pour l'entreprise. L'équilibre entre ces différents paramètres est recherché à chaque étape du

cycle de vie des actifs ainsi qu'aux différents niveaux fonctionnels (figure 22) et ce, pour des articles ou des composants d'équipements jusqu'à des systèmes fonctionnels complexes tels que des réseaux, des sites industriels (usines de production) ou des portefeuilles divers. La spécification (BSI PAS 55, 2008) décrit les éléments à mettre en œuvre pour réaliser une gestion d'actifs industriels performante. Nous retenons les quatre recommandations suivantes :

- Etablir une vision claire entre les objectifs de l'entreprise et l'exécution quotidienne des activités de gestions d'actifs à travers un plan stratégique pour la gestion des actifs ;
- Casser les organisations et le fonctionnement en silos ;
- Mettre en place une prise de décision basée sur le risque ;
- Se positionner dans une démarche d'amélioration continue

Généralement, cette approche apparaît comme une tentative d'unification de diverses méthodes et techniques applicables à différentes composantes de la fonction maintenance en vue de maximiser le profit sur le cycle de vie des équipements. Si ces principes sont établis, la formalisation d'une méthode de mise en œuvre reste à construire.

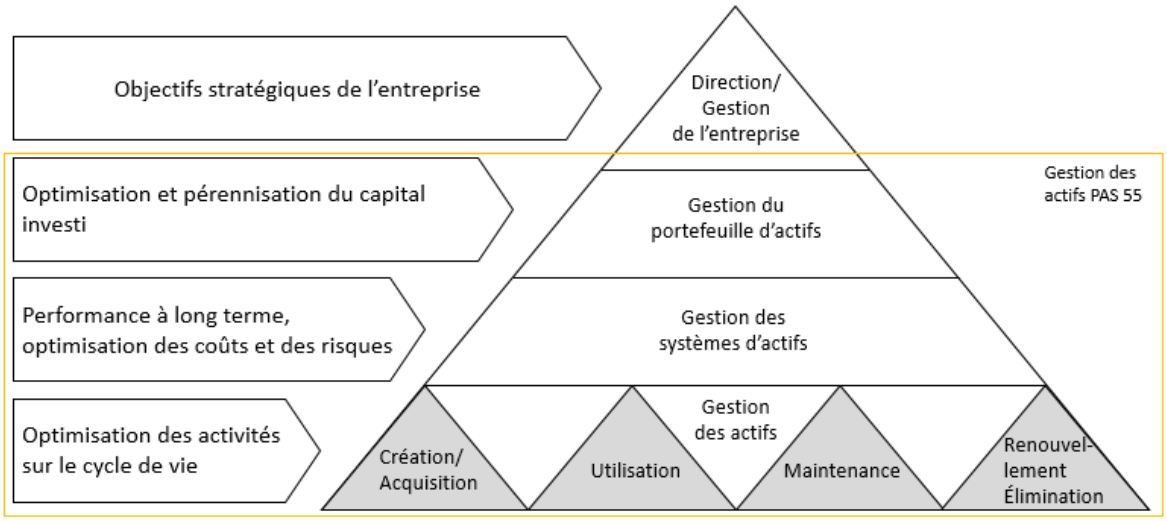


Figure 22: les niveaux d'actifs industriels et la gestion associée selon (BSI PAS 55, 2008)

Enfin, le Soutien Logistique Intégré (SLI), dernière approche cherchant à minimiser le coût de cycle de vie des équipements, est né aux Etats-Unis à l'initiative du département de la défense dans le cadre des grands systèmes d'armes avant d'être appliqué aux grands systèmes technologiques (Bardou, 2000). Il s'agit selon (Blanchard, 2003) d'une « approche structurée, généralisée et interactive des activités de gestion et des activités techniques nécessaires pour :

- Intégrer les considérations de soutien dans la conception des systèmes et des équipements;
- Elaborer des exigences de soutien en cohérence avec les objectifs de préparation des opérations;
- Acquérir et fournir le soutien requis pendant la phase opérationnelle à un coût minimum.

Par conséquent, le SLI comprend l'ensemble des activités liées au soutien logistique (gestion des pièces détachées, collecte des informations techniques, formation des équipes, etc.) tout au long du cycle de vie d'un équipement.

Le tableau suivant regroupe les principaux avantages et inconvénients des concepts de maintenance relevés dans la littérature (Fraser et al., 2015; Sherwin, 2000; Waeyenbergh and Pintelon, 2002).

Concepts	RCM	BCM	TPM	Approches LCC
Avantages	Structure et valorise l'expérience des équipes Implique les exploitants et les mainteneurs dans la construction des plans de maintenance Améliore la sécurité des installations	Formalise les objectifs de maintenance Aligne les objectifs de maintenance avec ceux de l'entreprise	Augmente la productivité et la qualité Permet de réduire les coûts Implique les exploitants dans les activités de maintenance	Améliore l'interface entre l'exploitant et l'ingénierie Structure la remontée d'informations Considère l'ensemble du cycle de vie des équipements
Inconvénients	Complexité Besoin important de données Se concentre sur la fiabilité Ne tient pas compte de l'aspect économique de la maintenance	Complexité Besoin important de données Concept vague dans sa mise en œuvre	Ne définit pas de règles claires concernant les actions de maintenance à mettre en œuvre Ne tient pas compte de l'aspect économique de la maintenance	Difficile à mettre en œuvre Approches relativement théoriques et peu structurées Complexité de l'analyse du coût de cycle de vie

Tableau 5: synthèse des principaux avantages et inconvénients des concepts de maintenance

Les concepts de maintenance ont pour particularité le fait d'avoir été déployé et testé dans un contexte industriel. La plupart des concepts présentés sont issus de problèmes industriels concrets qu'il ont contribués à résoudre. De ce fait, ils apportent une certaine garantie quant à leur pertinence vis-à-vis du monde industriel. Pour autant plusieurs limites - comme les ressources, le temps nécessaire pour les déployer et le manque de détails pour les mettre en œuvre - apparaissent lorsque nous cherchons à les adapter à des secteurs industriels éloignés de leurs secteurs d'origine. De plus, ces concepts et les critères développés pour optimiser la maintenance dans un contexte industriel donné peuvent être inadaptés à des contextes différents. Pour pallier ces diverses lacunes et répondre aux besoins d'amélioration et d'optimisation de la maintenance, (Scarf, 1997) *précise que la compréhension du processus d'optimisation est au moins aussi importante que les modèles eux-mêmes. Il semble donc pertinent d'étudier comment les différents modèles d'optimisation de la maintenance peuvent s'intégrer dans une démarche globale d'optimisation.*

2.3.Approches globales

Plusieurs modèles abordent l'optimisation de la maintenance en considérant la maintenance dans sa globalité, s'appuyant sur des modèles à la fois quantitatifs et qualitatifs. Nous présentons dans cette section les principales approches globales afin de comprendre leur logique et d'identifier les principales caractéristiques

En 1995, (Vanneste and Van Wassenhove, 1995) proposent une approche structurée autour du principe de la roue de Deming (Deming, 1986) pour améliorer la maintenance. Cette approche combine les éléments récents (en 1995) dans la théorie et la pratique de la maintenance, les technologies de l'information et les modèles d'aide à la décision pour résoudre les problèmes de maintenance. Elle est constituée de deux étapes principales : l'analyse de l'efficacité et l'analyse de l'efficience. La première, l'analyse de l'efficacité, identifie les principaux problèmes et les solutions potentielles. La seconde – analyse de l'efficience – définit comment réaliser les opérations identifiées précédemment de la manière la plus efficiente possible (figure 23).

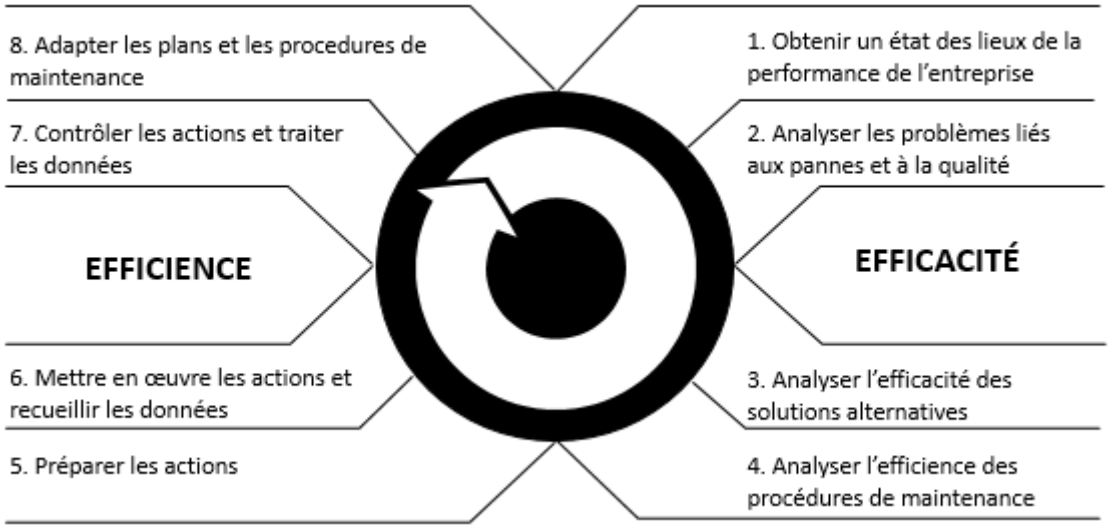


Figure 23: Aperçu de la méthode d'amélioration de la maintenance proposée par (Vanneste and Van Wassenhove, 1995)

L'approche d'amélioration de la maintenance proposée par (Vanneste and Van Wassenhove, 1995) repose sur deux grands principes directeurs : l'amélioration continue et la recherche de performance. Ces derniers guident le choix et l'intégration des différents outils issus des modèles d'optimisation présentés précédemment. Ces outils sont intégrés dans huit étapes que nous pouvons regrouper en 4 phases génériques. Tout d'abord, une phase d'analyse (étapes 1 et 2), à la fois macroscopique pour comprendre le fonctionnement global, les objectifs de la maintenance, et microscopique pour identifier et localiser les principaux problèmes de qualité

et d'indisponibilité. Ensuite, vient une étape de génération de solutions (étapes 3 et 4), où une analyse coût-bénéfice permet de déterminer l'efficacité de chaque solution. Dans la troisième phase, celle de mise en œuvre (étapes 5 et 6), les actions retenues sont préparées puis réalisées et, les indicateurs de performance définis en conséquence. A ce niveau, une attention particulière est portée sur l'organisation et les ajustements à réaliser pour recueillir la donnée nécessaire pour alimenter les indicateurs de performance. Enfin, la quatrième et dernière phase, évaluation et ajustements (étapes 7 et 8), permet de boucler le processus d'amélioration continue en s'assurant que les solutions mises en œuvre atteignent les objectifs ou les corrigent, dans le cas contraire.

(Márquez et al., 2009) proposent un cadre de management de la maintenance dans lequel nous retrouvons la notion de performance – décomposée en efficacité et efficience – et la notion d'amélioration continue (figure 24). Dans cette approche, nous retrouvons plus ou moins la même logique que dans celle décrite par (Vanneste and Van Wassenhove, 1995). Ici, les auteurs s'appuient davantage sur les concepts de maintenance, en proposant pour chaque étape des techniques issues de ces concepts. Ils utilisent notamment les analyses de criticité - pour définir les politiques de maintenance adaptées aux équipements - et les analyses de coût de cycle de vie pour optimiser le remplacement des équipements.

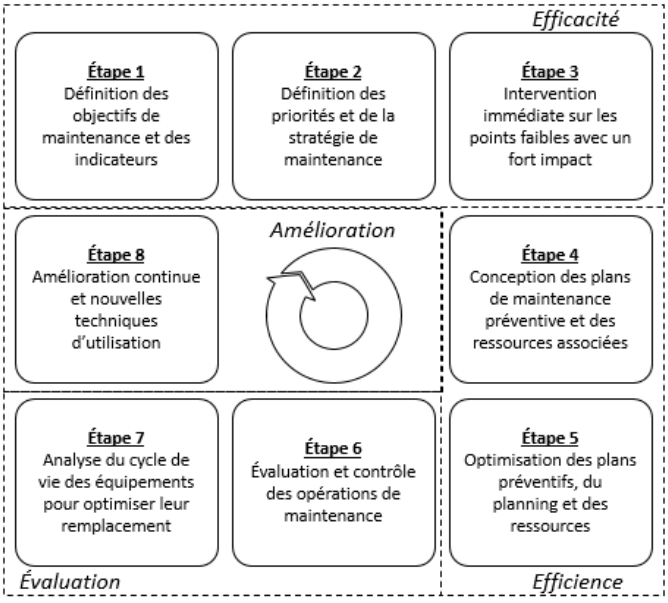


Figure 24: Modèle d'optimisation du management de la maintenance proposé par (Marquez et al.)

De leur côté, (Waeyenbergh and Pintelon, 2002) proposent un cadre pour permettre aux entreprises d'adapter et d'intégrer les différents concepts de maintenance à leur organisation. Ils partent du constat que, dans chaque modèle d'optimisation de la maintenance, recueillir et bancariser des données s'avèrera une des tâches les plus difficile. En conséquence, ils définissent un modèle composé de 4 modules agencés dans une démarche d'amélioration continue avec une attention particulière portée sur la collecte de données (figure 25).

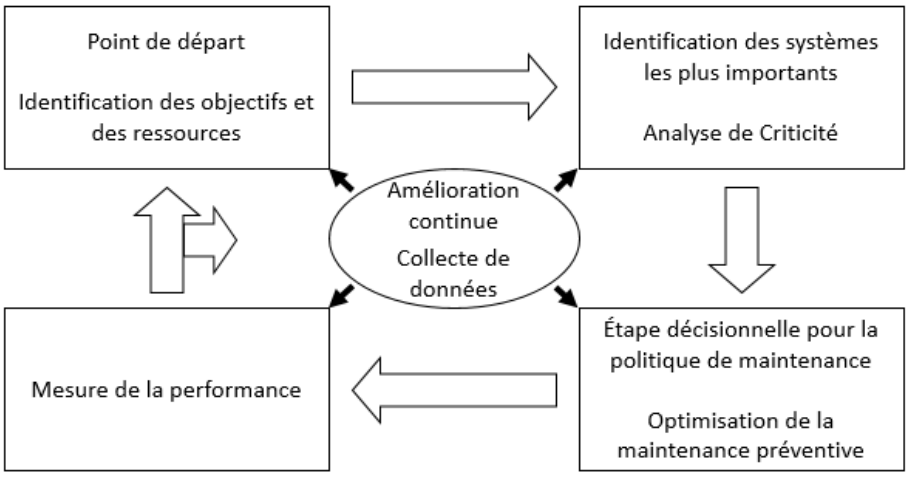


Figure 25: Vue d'ensemble schématique du cadre proposé par (Waeyenbergh and Pintelon, 2002)

Le premier module (« point de départ ») consiste à identifier les objectifs et les ressources nécessaires pour les atteindre. Le deuxième permet de prioriser les actions de maintenance en identifiant successivement les systèmes les plus importants puis leurs composants les plus critiques. Pour ces deux étapes, (Waeyenbergh and Pintelon, 2002) privilégient les techniques multicritères d'aide à la décision et les analyses de criticité, notamment des versions simplifiées des AMDEC. Après avoir défini la criticité de chaque composant des systèmes les plus importants, le troisième module permet de déterminer la politique de maintenance (cf. Tableau 1) la plus adaptée à chaque composant en utilisant un arbre de décision. Ce module permet également d'optimiser la maintenance préventive en déterminant la fréquence d'intervention de ces opérations. Le quatrième et dernier module évalue la performance de la maintenance et alimente la démarche d'amélioration continue. En fonction des résultats obtenus, certaines actions seront entreprises dans les trois précédents modules. De ce modèle, nous retiendrons l'importance accordée à la collecte de données qui se traduit essentiellement dans le choix et la mise en œuvre des outils d'analyse de criticité. Pour (Waeyenbergh and Pintelon, 2002), cette étape permet non seulement de recueillir les informations techniques et économiques, mais surtout la connaissance emmagasinée au fil du temps par les salarié : l'expérience. Ainsi, lors de ces analyses, ils suggèrent de solliciter simultanément les équipes de maintenance et d'exploitation pour élargir le périmètre de connaissances et anticiper voire éliminer un maximum de problèmes.

A travers ces trois premières approches, une structure autour du principe d'amélioration continue se dessine avec des étapes incontournables. Si la pertinence et les objectifs de ces étapes ne sont plus à discuter, il reste cependant à définir comment les réaliser.

(Wireman, 2015) identifie pour la maintenance plusieurs solutions à instaurer. Il s'agit des bonnes pratiques de maintenance qu'il définit comme « les pratiques de maintenance qui permettent à une entreprise d'obtenir un avantage compétitif sur ses concurrents en terme de maintenance ». Au total, onze bonnes pratiques avec un ordre de mise en œuvre à respecter (figure 26).

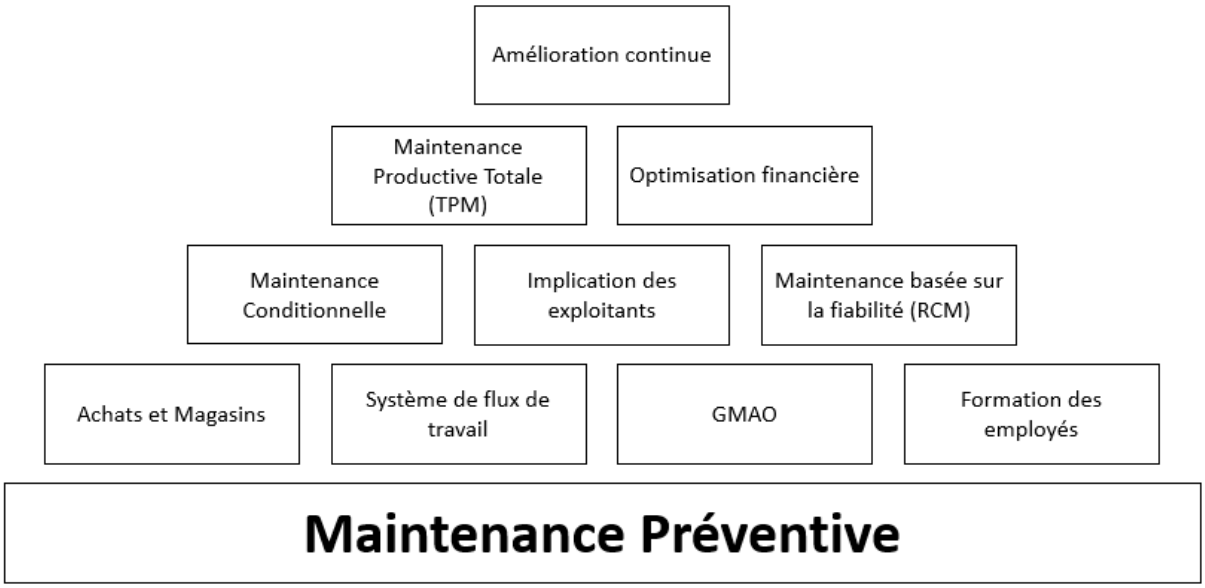


Figure 26: La pyramide du management de la maintenance (Wireman, 2015)

Selon lui, le point de départ et la base de cette démarche d'amélioration de la maintenance concerne la maintenance préventive. Parmi les bonnes pratiques de maintenance identifiées par (Wireman, 2015), certaines s'appuient sur les concepts de maintenance révélés précédemment (TPM, RCM, Achats et Magasins[6]), alors que d'autres abordent les dimensions technologiques (GMAO, Maintenance conditionnelle) et humaines (formation des employés) de la maintenance. A partir de ces bonnes pratiques, l'auteur décrit uniquement un fonctionnement idéal de la maintenance sans expliquer comment l'atteindre. En revanche, il présente un questionnaire pour réaliser un benchmark de ces bonnes pratiques et des valeurs idéales à atteindre.

Nous terminons cette section en présentant une partie des travaux de thèse de (Mikler, 2015) qui identifie, dans le fonctionnement optimal de la maintenance, quatre « cycles naturels d'amélioration continue » (figure 27) :

- Une fois un ordre de travail créé à partir d'une inspection (maintenance préventive) ou d'une demande de travail (maintenance corrective), le travail est planifié, coordonné,

[6] Bonnes pratiques issues du Soutien Logistique Intégré

exécuté et contrôlé. Pour les opérations récurrentes, il s'agit d'un cycle d'amélioration potentiel pour le contrôle du travail, des équipements, des coûts et la gestion de la qualité du travail (sur la figure : « amélioration de la planification des ressources ») ;

- Le deuxième cycle comprend les activités allant de l'identification d'un mode de défaillance, à l'analyse de la criticité, la préparation du travail, l'ordonnancement et l'exécution, l'évaluation et à la reprogrammation potentielle, c'est-à-dire le cycle d'**amélioration du travail** ;
- Le troisième cycle comprend des activités allant de la gestion des performances, à la gestion des capacités, la préparation et l'ordonnancement des ressources à long terme, et constitue le cycle d'**amélioration de** l'**organisation des ressources** ;
- Le quatrième et dernier cercle comprend le contrôle interne et externe des performances, la comparaison avec des critères de référence internes et externes et les audits des systèmes. Il s'agit d'un cycle d'**amélioration du processus de gestion de la maintenance** dans son ensemble.

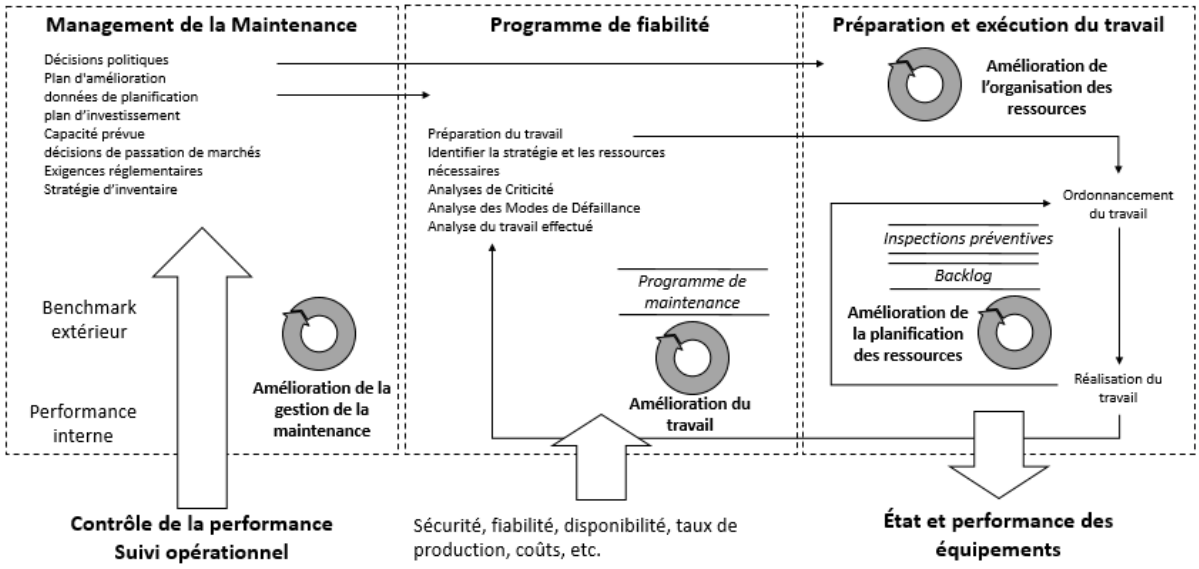


Figure 27: les cycles naturels d'amélioration continue au sein de la fonction maintenance selon (Mikler, 2015)

2.4.Synthèse sur les modèles d'optimisation de la maintenance

Il est admis qu'il n'existe pas de solution unique pour l'optimisation de la maintenance. La maintenance – à travers ses diverses activités et ses multiples objectifs - peut être optimisée selon plusieurs aspects. Au total, nous identifions cinq champs d'optimisation pour la maintenance correspondant aux principaux choix et orientations à lui donner. Ils concernent les étapes du cycle de vie des équipements à maintenir et celles du processus de maintenance (figure 21). Face à cela, les modèles d'optimisation de la maintenance deviennent de véritables

outils d'aide à la décision. Ils permettent aux entreprises de prendre les décisions les plus adaptées à leur contexte et, contribuent alors à optimiser la maintenance. La pertinence de ces outils par rapport à un contexte donné dépend de nombreux paramètres comme les critères d'optimisation retenus. La figure ci-dessous (figure 28) représente les principaux paramètres influençant les modèles d'optimisation de la maintenance.

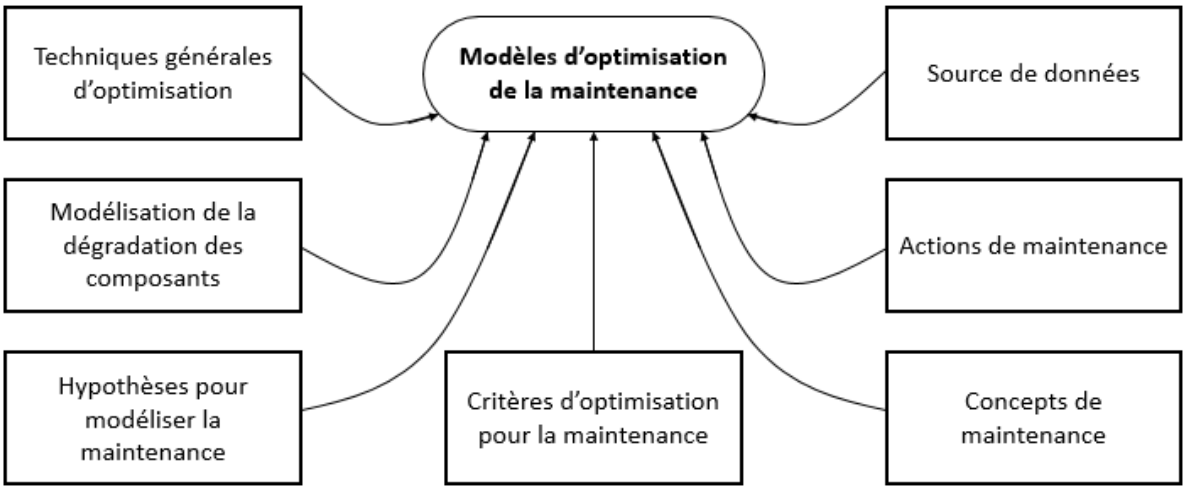


Figure 28: Paramètres influençant les modèles d'optimisation de la maintenance

Il existe dans la littérature de nombreux modèles d'optimisation de la maintenance ; nous distinguons trois catégories : les modèles quantitatifs, qualitatifs et les approches globales, combinaison des deux modèles précédents. Les modèles quantitatifs représentent une réponse essentiellement mathématique aux besoins d'optimisation de la maintenance, ignorant la dimension humaine et opérationnelle de cette dernière. Par conséquent, malgré la pertinence des résultats présentés, d'un point de vue théorique, ces modèles s'appliquent rarement à tout contexte industriel. Les modèles qualitatifs, quant à eux trouvent échos dans des applications élargies issues de différents secteurs industriels. Ils répondent - dans ce contexte - aux besoins d'optimisation de la maintenance tout en restant spécifiques aux domaines industriels dans lesquels ils ont été conçus. Ces modèles nécessitent de nombreuses ressources et demeurent relativement vagues concernant les étapes nécessaires à leur mise en œuvre, ce qui les rend difficilement transposables et applicables à d'autres contextes. Enfin, les approches globales cherchent à apporter une réponse pérenne aux besoins d'optimisation de la maintenance en structurant autour d'une démarche d'amélioration continue à la fois des modèles qualitatifs et quantitatifs. Ainsi, elles identifient une succession d'étapes à instaurer pour optimiser la maintenance. Cependant, ces approches n'abordent que très peu les questions liées à leur mise en œuvre notamment les liens entre les étapes ainsi que les conditions nécessaires pour passer

de l'une à l'autre. Pour ces raisons, ces approches sont surtout des recueils de bonnes pratiques plutôt que de véritables méthodologies d'optimisation de la maintenance.

Dans l'ensemble, les solutions d'optimisation de la maintenance cherchent à capitaliser les connaissances de l'entreprise pour définir les meilleures orientations à donner à la maintenance. Indépendamment des modèles d'optimisation mis en en œuvre, les entreprises doivent adopter une démarche d'amélioration continue permanente visant à parfaire leurs bases de données. La collecte de données exhaustives et fiables représente un enjeu important. A ce titre, les nouvelles technologies de l'information offrent des solutions notables et méritent une attention particulière (Choi et al., 2018; Sherwin, 2000).

3. La maintenance pour l'industrie 4.0

La métamorphose industrielle opérée par le numérique et les nouvelles technologies s'accompagne d'importantes attentes vis-à-vis de la maintenance. Selon (McKinsey & Company, 2015), cela permettrait de réduire les temps d'indisponibilité des équipements de 20 à 50 %, et de diminuer les coûts de maintenance de l'ordre de 20 à 30 %. Ces avancées technologiques représentent un potentiel d'optimisation considérable pour la maintenance. Pour réussir à le concrétiser, l'objectif de cette partie de notre état de l'art est d'identifier et de comprendre comment les évolutions technologiques peuvent impacter le fonctionnement et l'organisation de la maintenance. Ainsi, nous commençons par définir ce qu'est la maintenance pour l'industrie 4.0 et, présentons les principales technologies sur lesquelles elle repose. Puis, nous identifions ses usages potentiels et, déterminons les prérequis et moyens nécessaires à mettre en œuvre pour faire évoluer la maintenance vers l'industrie 4.0.

3.1. Définitions et caractéristiques de la maintenance 4.0

De la même manière que l'apparition de la machine à vapeur, de l'électricité ou de l'électronique a engendré au fil des siècles des changements considérables pour l'industrie, les nouvelles technologies - basées sur l'Internet des objets - révolutionnent à leur tour le monde industriel. Cette révolution, connue aujourd'hui sous le nom de « industrie 4.0 » a pour origine une initiative allemande - formalisée par (Kagermann et al., 2013) – visant à développer des systèmes de production avancés pour augmenter la productivité et l'efficience de leur industrie. L'industrie 4.0 représente une nouvelle étape industrielle pour les systèmes de production, intégrant un ensemble de technologies numériques émergentes qui apportent une valeur ajoutée à l'ensemble du cycle de vie des produits (Frank et al., 2019). Elle s'appuie sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), l'informatique, ainsi que les sciences et

technologies industrielles pour développer les futurs systèmes de production, en leur apportant trois caractéristiques majeures : l'acquisition intelligente de l'information, la connectivité entre les éléments d'un système, et la réactivité aux changements internes et externes (Monostori et al., 2016). Après avoir analysé plus de 600 publications concernant l'industrie 4.0, (Oztemel and Gursev, 2018) identifient six principes fondamentaux pour l'industrie 4.0 :

- **Interopérabilité** – capacité de deux systèmes à communiquer, se comprendre et utiliser les fonctions de l'autre (Hermann et al., 2016).
- **Virtualisation** – simule les fonctionnalités matérielles pour créer des services informatiques basés sur des logiciels, comme des applications ou des serveurs (Mijumbi et al., 2016).
- **Décentralisation** – indique que les entreprises, le personnel d'exploitation et même les appareils sont en mesure de prendre des décisions indépendantes plutôt que de dépendre d'une prise de décision centralisée (Koh et al., 2019).
- **Capacité en temps réel** – capacité de collecter, analyser et transmettre des données en temps réel (Koh et al., 2019).
- **Modularité** – indique que la production des composants d'un produit est standardisée afin qu'ils puissent être assemblés, remplacés, et développés dans un environnement de production modulaire (Qin et al., 2016).
- **Orientation vers les services** – indique que le produit doit être non plus considéré comme un produit en tant que tel, mais comme un service (Lasi et al., 2014).

De manière générale, bien que le terme industrie 4.0 suscite un fort engouement, aussi bien d'un point de vue industriel qu'académique, il n'existe pas encore de définition consensuelle de l'industrie 4.0 (Caiado et al., 2020). Pour la suite du manuscrit nous retiendrons la définition proposée par (Oesterreich and Teuteberg, 2016) qui définissent l'industrie 4.0 comme « l'évolution vers la digitalisation et l'automatisation de l'environnement de production ». Cette définition - ni plus précise ni moins vague qu'une autre - traduit à notre sens deux notions fondamentales de l'industrie 4.0 ; à savoir que l'industrie 4.0 est avant tout une transformation des entreprises basée sur les nouvelles technologies, et que cette transformation concerne l'ensemble de la production (aussi bien les usines que les chaînes d'approvisionnement et, les machines industrielles que les employés). A l'ère du 4.0, la digitalisation est considérée comme l'intégration et l'optimisation de l'information et du flux de biens tout au long de la chaîne d'approvisionnement (Bogner et al., 2016). Pour (Schuh et al., 2020) elle est à la fois un

facilitateur et un prérequis fondamental pour atteindre l'industrie 4.0. En ce sens, (Weking et al., 2020) considèrent l'industrie 4.0 comme l'état final de l'industrie une fois digitalisée. Cette évolution de l'industrie repose sur plusieurs technologies disruptives telles que l'Internet des Objets (*IoT – Internet of Things*) ou les Systèmes Cyber-Physiques (*CPS – Cyber-Physical Systems*). Outre ces deux technologies, (Frank et al., 2019) identifient les analyses *Big Data* (*BDA – Big Data* Analytics) et le *Cloud Computing* comme les technologies de base pour l'industrie 4.0. Sur les principes des technologies 4.0, un consensus commence à se dessiner. En revanche, sur les détails, la recherche est en cours et peut dans certains cas être source de divergence. Dans l'ensemble nous pouvons retenir huit technologies (Caiado et al., 2020; Oztemel and Gursev, 2018) que nous présentons en annexe 2.

Dans ce nouveau contexte industriel, la maintenance est également amenée à évoluer. Selon un rapport de l'Alliance Industrie du Futur (Alliance Industrie Du Futur, 2018), les trois enjeux de cette révolution industrielle pour les métiers de la maintenance sont de Collecter, Analyser et Exploiter les données de tous les « actifs industriels » pour permettre une prise de décision rapide et ciblée. Aujourd'hui, l'utilisation sur les machines de production de capteurs en tous genres reliés à l'Internet (IoT) permet de collecter massivement et en temps réel des données sur les caractéristiques du process. Ces données sont ensuite analysées grâce aux technologies du *Big Data* pour faciliter la prise de décision. C'est à partir de ces deux technologies de l'industrie 4.0 que plusieurs concepts autour de la maintenance ont émergé. Nous retrouvons dans la littérature les termes suivants : *E-Maintenance* (Iung et al., 2009), *Smart Maintenance* (Fumagalli et al., 2016), *Predictive Maintenance* (Lee et al., 2017), *Maintenance 4.0* (Kumar and Galar, 2018), *Continuous Maintenance* (Roy et al., 2016) ou encore *Prognostics and Health Management* (Cheng et al., 2010) pour décrire la maintenance dans l'industrie 4.0. Dans l'ensemble, si les noms retenus pour définir la maintenance dans l'industrie 4.0 varient selon les auteurs, les définitions proposées tendent à caractériser un seul et même concept où les décisions prises concernant la maintenance se basent sur des données. Dans la suite du manuscrit nous utiliserons le terme « Maintenance 4.0 » pour faire référence à ce qu'est la maintenance dans l'industrie 4.0.

Aujourd'hui, aucune définition universelle n'existe dans la littérature pour définir la maintenance 4.0. En effet, les définitions proposées en décrivent seulement certains aspects. Et comme les possibilités offertes à la maintenance par les nouvelles technologies semblent illimitées, il paraît difficile de les condenser en quelques mots dans une définition. Pour comprendre et identifier ce qu'est la maintenance 4.0 il nous semble pertinent de décrire comment ces nouvelles technologies vont influencer les activités de maintenance. Dans cette optique nous identifierons comment ces technologies impactent le fonctionnement de la maintenance à travers des usages potentiels.

3.2.Les usages pour la maintenance

L'industrie 4.0 révolutionne l'environnement de production et, amène les scientifiques et les industriels à repenser la manière de produire et de travailler. Le saut technologique est tel qu'il offre de nombreuses solutions permettant d'améliorer la performance des entreprises. Ainsi, nous retrouvons dans la littérature plusieurs scénarios décrivant comment les nouvelles technologies impactent le fonctionnement de la maintenance. (Bokrantz et al., 2017) ont sollicité un panel d'industriels pour examiner un total de 34 projections concernant les changements potentiels de l'environnement de maintenance et décrire ainsi le fonctionnement probable de la maintenance en 2030 au sein de l'industrie 4.0. Ils identifient huit scénarios ayant une forte probabilité de se réaliser (selon les experts) et, dotés d'un impact considérable pour les activités de maintenance. Nous décrivons ci-dessous ces scénarios :

- ***Les analyses de données*** – Plusieurs types de données issues de différentes sources sont analysées ensemble pour détecter des tendances/modèles.

  De nouveaux développements sur l'analyse des données permettront à la maintenance d'utiliser efficacement les données comme aide à la décision en 2030. La valeur apportée par les analyses de données résidera dans la capacité à identifier les tendances/modèles, les causes racines, et prendre des mesures proactives pour éviter des défaillances. Cela contribuera à accroître la productivité. Cette valeur augmentera considérablement lorsque plusieurs types de données seront intégrés (ex : historique des données de productions, historique des défaillances, etc.).
- ***Interopérabilité*** – Des standards sont développés et mis en œuvre dans l'industrie pour l'intégration des systèmes d'information tels que la GMAO[7], MES [8]ou PLM[9].

  Pour la maintenance, les standards d'interopérabilité permettront d'intégrer des équipements de production et des systèmes d'information de différentes plateformes de fournisseurs. Les défis à relever pour parvenir à ces standards communs d'ici 2030 incluent notamment la concurrence et la réticence à abandonner les systèmes propriétaires actuels.
- ***Big Data Management*** – Des quantités gigantesques de données sont générées par les équipements ; la maintenance met l'accent sur le fait d'identifier et d'analyser les données pertinentes pour prendre les bonnes décisions.

[7] GMAO – Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
[8] MES – Manufacturing Execution System – Logiciel de Pilotage de la Production
[9] PLM – Product Lifecycle Management – Gestion du cycle de vie d'un produit

En 2030, les données générées en masse par les équipements représentent un potentiel immense pour la maintenance en tant qu'aide à la décision. Pour autant ces données n'ont de valeurs qu'une fois exploitées, ce qui nécessite le développement de compétences, de ressources et de systèmes. La maintenance utilise au quotidien des données pour prendre les décisions, de ce fait elle ne doit gaspiller ni de temps ni de ressources pour structurer, trier et hiérarchiser des données non pertinentes. Les défis ici consistent à obtenir des données de qualité conformes aux usages et, à développer des systèmes de gestion de la maintenance qui transforment automatiquement les données en outils d'aide à la décision.

- ***Education et Formation*** – La maintenance met l'accent sur l'éducation et la formation continue de la main d'œuvre pour suivre les évolutions technologiques et s'assurer d'avoir les compétences nécessaires.

  Pour être compétitif en 2030, l'éducation et la formation continue sont une nécessité absolue. Le développement rapide des technologies numériques exige que le profil des compétences des employés de maintenance évolue au même rythme. Les défis à relever consistent à communiquer les besoins en matière d'éducation et de formation aux cadres supérieurs et, à mettre au point de nouveaux modes de formation innovants.

- ***Préparation et programmation des interventions de maintenance basées sur des faits*** – Les décisions fondées sur des faits sont le fondement de la préparation des interventions de maintenance, notamment grâce aux outils d'aide à la décision basés sur des analyses de données prévisionnelles et prescriptives.

  En 2030, les analyses prévisionnelles permettent d'anticiper les perturbations et les pannes du système de production. La maintenance peut programmer ses interventions en s'appuyant sur des estimations de la durée de vie utile des équipements, plutôt que sur des diagnostics et la détection des pannes. Les analyses prescriptives complètent les analyses précédentes en suggérant les « contre actions » les plus appropriées. Le principal défi consiste à intégrer ces différentes analyses de données dans des systèmes d'aide à la décision simples d'utilisation.

- ***Programmation des interventions de maintenance avec une perspective système*** – Les interventions de maintenance sont programmées sur la base des informations fournies par les équipements (ex : alarmes, capteurs de dégradation) combinées à une perspective système (ex : plan de production) afin d'optimiser les performances de l'ensemble du système de production.

En 2030, la programmation des interventions de maintenance ne sera plus dictée par les besoins individuels des machines de production, mais par les besoins de l'ensemble du système de production. Ce principe se traduira par une différenciation et une hiérarchisation des activités de maintenance en fonction des contraintes actuelles du système de production.

- ***Des procédures de travail intelligentes*** – Les nouvelles technologies permettent un « travail intelligent » comme la surveillance et le contrôle en ligne en temps réel des équipements ou les inspections à distance.

  L'adoption des technologies numériques est déjà avancée et, d'ici 2030, celles-ci seront davantage utilisées dans les services maintenance. La maintenance en temps réel permet de surveiller en permanence les performances et l'état des équipements, ce qui donne une vue d'ensemble du système de production et, la possibilité de réagir rapidement aux perturbations et aux pannes. Cela réduit également les temps de réponse et les délais de réparation. Le défi ne sera pas de construire la technologie, mais d'amener les gens à l'utiliser correctement et, de créer une organisation favorisant les nouvelles méthodes de travail.
- ***Législation et normes environnementales*** – Le renforcement de la législation et des normes environnementales (ex : réduction des émissions de CO_2 et de GES) a accru la pression sur la maintenance, qui doit à présent garantir que les équipements répondent à l'ensemble des prescriptions législatives et des exigences environnementales.

  Etant donné qu'une grande fiabilité des équipements est nécessaire pour se conformer à la législation et aux normes, la maintenance jouera un rôle central pour permettre aux systèmes de production d'atteindre une viabilité écologique. La technologie numérique aidera la maintenance à respecter les exigences environnementales, notamment en surveillant et en prévoyant la consommation d'énergie ainsi que les défaillances entraînant de fortes émissions de CO_2.

Ces huit scénarios donnent un aperçu plus concret - d'un point de vue industriel - de ce que peuvent apporter les nouvelles technologies pour la maintenance. Dans un rapport, le cabinet de conseil McKinsey (McKinsey & Company, 2020) identifie deux principes fondamentaux pour la maintenance auxquels les nouvelles technologies permettent de répondre. Il s'agit de « maintenir lorsque cela est nécessaire » et « maintenir de manière efficiente ». En s'appuyant sur la définition de la notion de performance de (Gibert, 1980), nous retrouvons derrière ces

deux principes les notions d'efficacité et d'efficience. Ainsi, nous regroupons la plupart de ces scénarios selon ces deux notions.

Des quantités gigantesques de données sont générées par les équipements (*Big Data Management*) et stockées dans différents systèmes d'information qui, grâce à la mise en place de standards, peuvent facilement les échanger (*Interopérabilité*). Toutes ces données sont ensuite analysées (*Analyse de données*) pour détecter des tendances. Elles permettent entre autre, grâce aux analyses prévisionnelles et prescriptives, d'anticiper l'apparition de pannes et d'identifier les causes potentielles. Ainsi, les activités de maintenance peuvent s'organiser selon ces deux types d'informations (*Préparation et programmation des interventions de maintenance basée sur des faits*). Plus les données collectées seront importantes et variées, meilleure sera la compréhension de l'ensemble du système de production. Les interventions de maintenance seront alors programmées en tenant compte du contexte global de l'usine, et non plus uniquement du contexte de l'atelier ou de l'équipement de production (*Programmation des interventions de maintenance avec une perspective système*). Ces cinq scénarii décrivent la maintenance 4.0 comme un outil d'aide à la décision permettant d'orienter les activités de maintenance pour en améliorer l'efficacité. Ils illustrent également l'importance fondamentale des données sur lesquelles reposent toutes les prises de décision liées à la maintenance. (Karim et al., 2016) partagent cette vision de la maintenance 4.0, où les décisions prises sont plus nombreuses, plus rapides et davantage basées sur des données. Ils détaillent quatre phases d'analyse pour la maintenance 4.0 :

- ***Les analyses descriptives*** – permettent de répondre à la question « Que s'est-il passé? ». Elles se basent sur des données de fonctionnement qui traduisent l'état de l'équipement et, des données caractérisant les conditions de fonctionnement attendues ;
- ***Les analyses de diagnostic*** – permettent de répondre à la question « Pourquoi cela s'est produit ? ». Ces analyses utilisent des données précédentes, ainsi que des données de fiabilité de l'équipement ;
- ***Les analyses prévisionnelles*** - permettent de répondre à la question « Que va-t-il se passer, et quand ? ». Pour y parvenir d'autres données sont nécessaires comme les historiques de maintenance, ou les opérations prévues sur l'équipement

  La norme (AFNOR, 2002) définit la maintenance prévisionnelle comme « la maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ». Les analyses prévisionnelles sont utilisées pour des modélisations « *what-if* ». Elles intègrent des

données en temps réel et des données historiées pour permettre aux équipes d'estimer les conséquences potentielles des comportements et les états de fonctionnement.

- ***Les analyses prescriptives*** – permettent de répondre à la question « qu'est ce qui doit être réalisé ? ». Sous-entendu pour éviter, retarder l'apparition de la panne, ou du moins limiter son impact sur la production. Cela fait appel à toutes les données citées précédemment. Selon (Franzen et al., 2019) la maintenance prescriptive peut aller plus loin. En fonction des objectifs fixés par le plan de maintenance (ex: obtenir une certaine disponibilité à un certain coût), la maintenance prescriptive émet des actions à réaliser pour atteindre l'objectif initial fixé. Ces actions peuvent aussi bien impacter la maintenance (graissage à réaliser, changement de roulement, etc.) que la production (consigne d'entrée de l'équipement).

La qualité de ces analyses et les décisions qui en découlent dépendent de la qualité et de la quantité des données collectées. (Karim et al., 2016) formalisent sous le nom de « découverte de la connaissance » le processus permettant d'obtenir de la connaissance à partir de données.
L'amélioration de l'efficience de la maintenance passe quant à elle par le développement de procédures de travail intelligentes. (McKinsey & Company, 2020) détaille deux problèmes auxquels ces procédures offrent des solutions :

- Les temps de trajets trop longs pour se rendre au niveau de l'équipement ;
- Les besoins croissants en main d'œuvre spécialisée.

La première difficulté peut être surmontée grâce à une meilleure répartition des ressources sur les interventions. L'idée est – selon la localisation des employés, leurs compétences, l'urgence de l'intervention, le temps nécessaire pour la réaliser, etc. – d'automatiser et de dynamiser la préparation et l'ordonnancement des interventions de maintenance à l'aide d'algorithmes, pour réduire au maximum les temps de trajet des employés. Là encore de nombreuses informations (localisation des équipements, compétences et localisation des employés, liste des interventions à effectuer, etc.) sont nécessaires pour mettre en œuvre cette démarche. La deuxième difficulté peut être surpassée en numérisant les instructions et consignes pour effectuer les opérations de maintenance. Les instructions accompagnent les employés sur le terrain grâce à des tablettes numériques ou de lunettes de Réalité Augmenté (ou réalité mixte) ce qui leurs permet de pré-visualiser sur l'équipement, les opérations à effectuer. Ce dispositif complète et améliore les compétences des employés qui peuvent ainsi réaliser des opérations avec lesquelles ils ne sont pas encore familiarisés. De plus, un réseau d'assistance à distance peut compléter les instructions numériques. L'employé rencontrant des difficultés pour effectuer une opération

spécifique pourra appeler un expert du domaine et lui montrer, via une caméra, les difficultés rencontrées.

Tous ces changements et apports ne se feront qu'avec une participation active des employés. C'est pourquoi, ces derniers devront être intégrés le plus en amont possible dans la démarche et, formés pour utiliser ces nouveaux outils.
Les usages potentiels pour la maintenance dans l'industrie 4.0 délivrent un bon aperçu de ce qu'est la maintenance 4.0. Nous en retiendrons une caractéristique essentielle : la maintenance 4.0 offre aux industriels une meilleure connaissance de leur patrimoine grâce à l'exploitation des données de masse, ce qui permet d'augmenter, d'accélérer et ainsi améliorer les prises de décisions basées sur des faits.

3.3.Conditions, prérequis, et moyens de mise en œuvre

Bien que les avantages de la maintenance 4.0 soient pour la plupart identifiés et compris par les industriels, le niveau d'implémentation de ce concept dans les industries est encore faible (Frank et al., 2019). Plusieurs raisons expliquent cela. Tout d'abord, comme le soulignent (Frank et al., 2016), la transformation digitale de la maintenance nécessite d'importants investissements dans les infrastructures technologiques. A cela s'ajoutent des experts de divers domaines qui ne sont généralement pas présents dans les entreprises (Colli et al., 2019). Une autre raison est le manque de connaissances de la part des industriels sur le précepte de l'industrie 4.0. Or, de nombreuses organisations définissent cette dernière comme leur objectif de développement, sans savoir ce que cela signifie ou comment y arriver (Ghobakhloo, 2018). De manière plus générale, beaucoup d'entreprises ne disposent ni des prérequis nécessaires pour réussir à implémenter les concepts de l'industrie 4.0, ni même d'une stratégie à mettre en œuvre. A partir d'un travail effectué avec quatre entreprises allemandes dans le secteur des médias, (Hess et al., 2016) identifient un ensemble de questions stratégiques qu'un responsable, en charge de la transformation digitale de son entreprise, doit absolument se poser. Ils identifient onze questions réparties en quatre dimensions:

- L'utilisation des technologies ;
- Les changements dans la création de valeurs ;
- Les changements structurels ;
- Les aspects financiers.

Cela leur permet de formaliser une approche systématique pour formuler une stratégie de transformation digitale. Le principal constat est qu'il n'existe aucune réponse universelle et définitive à ces questions. De ce fait, les auteurs proposent pour chaque question plusieurs réponses, ce qui permet aux entreprises à la fois de se positionner vis-à-vis des prérequis nécessaires pour mettre en œuvre la transformation digitale et, d'établir leur stratégie. Hormis

la deuxième dimension - les changements dans la création de valeur - qui varie considérablement selon les secteurs d'activité et les modèles économiques des entreprises, tous ces aspects sont pertinents et peuvent être appliqués à d'autres secteurs industriels (Hess et al., 2016). La dimension technologique et, plus précisément la maturité numérique des entreprises est un facteur majeur pour la réussite de leur transformation digitale (Mittal et al., 2018). Cette dimension est notamment retenue par (Caiado et al., 2020) pour évaluer le niveau global de maturité et de préparation des entreprises vers l'industrie 4.0. Ils identifient cinq niveaux pour évaluer la maturité de la gestion des opérations et de la chaîne logistique (*supply chain*). Le niveau 0 - ***Non existant*** – étant le plus faible, où aucun standard est en place, et le processus n'a pas les technologies appropriées pour construire une infrastructure nécessaire à la révolution digitale. Le niveau 4 - ***Auto-Optimisé*** – étant le plus abouti. A ce niveau, le processus est orienté vers le numérique et repose sur des infrastructures technologiques solides. Les données disponibles permettent alors de réaliser des simulations en temps réel et favorisent les prises de décisions collaboratives ; les compétences d'intelligence artificielle et d'auto-apprentissage sont parfaitement intégrées dans les systèmes d'information ce qui permet d'anticiper et d'optimiser la production à venir. Pour la maintenance, ils proposent à chaque niveau un ensemble de caractéristiques permettant d'en évaluer la maturité digitale (tableau 6).

0 – Non existant	1 – Conceptuel	2 – Maîtrisé	3 – Avancé	4 – Auto-Optimisé
- Réalisation de maintenance Préventive et Corrective - Inspections et tournées effectuées sur place par des employés	- Mise en place d'indicateurs de performance et de suivi des pannes - Collecte de données du processus de production à travers des capteurs	- Utilisation du Data Mining pour la maintenance conditionnelle et l'analyse des causes racines - Inspections à distance pour les endroits inaccessibles	- Analyses prévisionnelles pour la maintenance - Utilisation de robots guidés à distance pour effectuer les opérations de maintenance	- Utilisation d'un système intelligent d'aide à la décision pour la maintenance - Utilisation d'installations et d'équipements autoréparables

Tableau 6: Niveaux de maturité digitale pour la maintenance selon (Caiado et al., 2020)

A travers le modèle proposé par (Caiado et al., 2020) *et plus particulièrement le tableau 8, nous constatons que la maturité digitale d'une entreprise évolue en fonction de la maîtrise qu'elle a de ses données : les technologies évoluant pour lui permettre cette meilleure maîtrise. L'autre point à relever concerne les premiers niveaux, où la maîtrise de la donnée passe non pas par l'utilisation de nouvelles technologies, mais par la mise en place de bonnes pratiques telles que la maintenance préventive (inspections, tournées) ou le suivi d'indicateurs de performance. Dans leur « Roadmap » vers la maintenance 4.0,* (Kasper and Miklovic, 2017) *identifient comme première étape, l'alignement de l'entreprise sur les meilleures pratiques. Le fait de mettre en œuvre ces standards offre une certaine souplesse pour configurer le processus maintenance en fonction des besoins spécifiques de l'entreprise et de son secteur d'activité.*

3.4.Synthèse sur la maintenance pour l'industrie 4.0

Dans le nouveau contexte industriel – industrie 4.0 – caractérisé par la production et l'échange de données en masse, la bonne utilisation de ces données en temps réel est un élément clé. Dans cet environnement, l'enjeu pour la maintenance est triple : collecter, analyser et exploiter les données industrielles. La maintenance 4.0 s'appuie sur les technologies de l'industrie 4.0 en particulier celles de l'*Internet of Things* et du *Big Data Analytics*, pour anticiper le comportement et les défaillances de l'outil de production (équipement, atelier, usine) et estimer sa durée de vie résiduelle utile. Ces analyses constituent pour la maintenance un véritable outil d'aide à la décision qui lui permet d'organiser ses activités de manière plus performante. Selon (McKinsey & Company, 2015), cela représente une réduction des coûts de maintenance de l'ordre de 20 à 30 %. Pour autant, en raison du manque de connaissances et de méthodes des industriels ainsi que du coût d'investissement important dans les nouvelles technologies, le niveau d'implémentation de la maintenance 4.0 dans les industries reste encore faible. Si la dimension technologique est un élément indispensable pour - à terme - digitaliser le processus maintenance, plusieurs auteurs suggèrent dans un premier temps de bien formaliser le processus maintenance au travers la mise en œuvre des meilleures pratiques et des standards de maintenance. Cette révolution industrielle modifie considérablement l'environnement de production et entraîne également d'importants changements pour les employés. La réussite des projets de digitalisation du processus maintenance dépend logiquement des deux éléments fondamentaux suivants : les données et le facteur humain (Roda et al., 2018).

De manière plus générale, la dimension humaine est un élément essentiel à considérer lorsque nous cherchons à faire évoluer une organisation. La mise en œuvre de nouvelles technologies ou de nouvelles méthodes de travail pour optimiser la maintenance implique d'importants changements pour les employés de maintenance. Pour maximiser les chances de réussite d'un tel projet de transformation, il nous semble important de comprendre les principes et les enjeux de la conduite du changement.

4. La conduite du changement

Nous l'avons constaté dans la première partie de notre état de l'art, la maintenance ne se résume pas uniquement à des questions techniques. La dimension humaine est importante dans l'objectif de performance globale. Pour contribuer pleinement à l'optimisation de la maintenance, les multiples modèles d'optimisation, solutions techniques ou autres approches d'amélioration présents dans la littérature doivent être déployés et mis en œuvre par le personnel en charge de la maintenance (du technicien au responsable maintenance). 70% de toutes les

transformations de maintenance échouent et n'atteignent pas leurs objectifs (McKinsey & Company, 2020). La prise en compte de la dimension humaine, notamment sous l'angle de la conduite du changement est centrale dans une démarche globale d'optimisation de la maintenance. Dans cette partie, nous chercherons donc à comprendre comment s'opère la conduite du changement et, à identifier les principales solutions et facteurs clés de succès.

4.1.Paradigme et stratégie globale du changement

Aujourd'hui, dans un environnement économique qui se mondialise de plus en plus, et accroît de ce fait la concurrence entre les entreprises, le changement devient une nécessité pour continuer à être performant. Ainsi, les organisations industrielles ajustent constamment leurs activités à un environnement en mutation permanente (By, 2005; Kotter, 1996). La littérature propose de nombreuses définitions et méthodes pour piloter et mettre en œuvre le changement. Pour autant, les entreprises rencontrent toujours un taux d'échec important – 70% - dans leurs initiatives de changement (Balogun and Hope-Hailey, 2008; Beer and Nohria, 2000) ; et (Jansson, 2013) note que ce taux n'est pas près de diminuer. Malgré la multitude de méthodes de changement, aucune - ni même plusieurs (méthodes) – ne parviennent à couvrir la diversité des situations de changement (Burnes and Jackson, 2011). Il importe donc d'identifier et de comprendre les différentes situations de changement pour pouvoir appliquer les modèles appropriés. Pour cela, nous utilisons les travaux de recherche de (Al-Haddad and Kotnour, 2015) qui présentent une revue exhaustive de la littérature sur le changement. Ils identifient dans un premier temps les différentes disciplines - et les principaux auteurs associés - ayant contribué au changement et, les regroupent ainsi :

- ***La sociologie et la psychologie*** qui expliquent comment et pourquoi les gens réagissent au changement ;
- ***Le management et le leadership*** qui fournissent les principes et les pratiques permettant de préparer, organiser et diriger les personnes et les ressources réalisant le changement ;
- ***La gestion technique et le génie industriel*** qui identifient des méthodes détaillées de changement, des processus et des systèmes intégrés permettant de réaliser le changement, ainsi que les valeurs et les compétences nécessaires au changement.

Tous ces éléments sont – d'après (Al-Haddad and Kotnour, 2015) - essentiels pour analyser et comprendre la littérature scientifique concernant le changement.

Dans un second temps, ils classent la littérature sur le changement en quatre domaines : ***les types de changement***, ***les résultats du changement***, ***les catalyseurs du changement*** et ***les méthodes de changement***.

Les types de changement peuvent se définir comme les caractéristiques essentielles qui décrivent le genre et la forme du changement. Plusieurs auteurs proposent différentes caractéristiques, parmi elles nous en retiendrons deux: la durée du changement, et l'échelle à laquelle il se produit. Les changements à grande échelle représentent des modifications globales des processus et des comportements d'une organisation (Oldham, 2009). Ils sollicitent toutes les parties prenantes et requièrent, pour réussir, d'avoir à la fois une forte collaboration et un leadership visionnaire (Boga and Ensari, 2009). Pour ce type de changement, (Kotnour, 2011) attire notre attention sur l'importance de définir précisément la stratégie, les rôles de chacun et, d'aligner les processus, les ressources et la main d'œuvre. Les changements à petite échelle, quant à eux, s'initient et se gèrent plus facilement car ils nécessitent un niveau de leadership bien différent que ceux des changements à grande échelle. Ce facteur avantage et accroît leur taux de réussite. Ce constat se vérifie également pour les changements à court terme qui, comparés aux changements sur le long terme, connaissent plus de succès. Ces derniers nécessitent notamment un fort leadership et une grande implication des employés tout au long du processus de changement. A ce titre, le comportement humain doit être considéré (Harrison, 2011). Pour y répondre, (Rachele, 2012) suggère d'utiliser des méthodes comme la recherche-action participative pour susciter une réelle implication des personnes dans le projet de changement de l'entreprise.

Les résultats du changement, conséquences du changement sur l'organisation, nécessitent une évaluation pour permettre aux entreprises de s'assurer de la bonne gestion des opérations et de l'atteinte des objectifs (Wouters and Sportel, 2005). Ils peuvent être classés selon deux catégories :

- L'atteinte des objectifs du projet, c'est-à-dire la capacité du projet de changement à fournir le niveau de performance espéré dans les temps impartis, et avec les ressources attribuées ;
- La satisfaction des clients vis-à-vis des résultats.

Les catalyseurs du changement permettent d'augmenter la probabilité de succès des projets d'évolution des entreprises. Des études issues de la littérature proposent un large éventail de

définitions et d'exemples de catalyseurs du changement. Parmi eux, nous citerons : le fait d'établir clairement la vision et les objectifs du projet de changement, de définir le rôle de chaque personne impliquée dans le changement, d'avoir un engagement total des dirigeants ou encore de former les employés tout au long du projet (Ackerman Anderson and Anderson, 2010; Griffith-Cooper and King, 2007; Kenny, 2006). Pour bien comprendre comment ils contribuent à l'effort de changement mené par les entreprises, nous utilisons les travaux de (Ackerman Anderson and Anderson, 2010) qui décrivent les stratégies globales de changement avec trois aspects : le contenu, les personnes et le processus (figure 29).

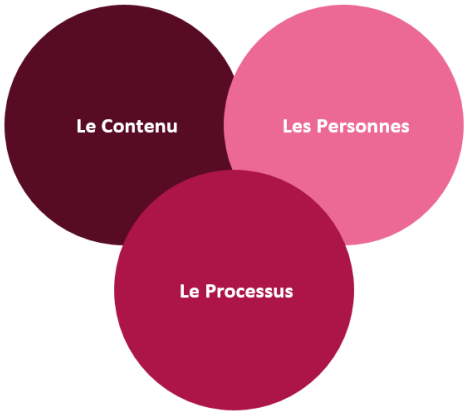


Figure 29: Les trois aspects des stratégies globales de changement selon (Ackerman Anderson and Anderson, 2010)

Le contenu fait référence aux actions d'amélioration à mettre en œuvre, aux technologies utilisées ainsi qu'aux nouvelles méthodes de travail pour optimiser, créer de la valeur pour l'entreprise et gagner en compétitivité. A ce niveau, (Bayerl et al., 2013) précisent que la technologie est de façon générale essentielle pour conduire le changement, et joue également un rôle de catalyseur.

Les personnes représentent les individus impliqués dans le changement, leur état d'esprit et leur comportement. Il s'agit véritablement de la façon dont les gens pensent, se sentent et se comportent sur leur lieu de travail et ce, tant individuellement que collectivement. Cet aspect est communément appelé : la dimension humaine du changement. Pour (Moran and Brightman, 2000), plus le changement organisationnel est profond et plus il sera important que chaque personne impliquée fasse évoluer sa perception de son travail. C'est pourquoi, (van den Heuvel et al., 2014) accordent une importance particulière à l'humain pour augmenter les chances de succès de changement.

Enfin, ***le processus*** concerne les actions et les procédures menées pour conduire le changement. Pour (McKinsey & Company, 2016), il s'agit véritablement de l'infrastructure mise en place pour supporter le changement. Elle se compose : d'une gouvernance, avec à sa tête un responsable de la transformation (*Chief Transformation Officer – CTO*), d'un programme de réunions hebdomadaires et d'outils de « *reporting* » permettant aux dirigeants de suivre l'avancée et l'impact final des initiatives. En définitive, l'alignement adéquat entre ces trois

aspects (contenu, personnes et processus) mène à un changement réussi. Chaque catalyseur améliore un ou plusieurs de ces aspects et contribue *in fine* à atteindre cet alignement adéquat. Le quatrième domaine identifié dans la littérature du changement concerne les méthodes de changement. Nous l'abordons dans la section suivante.

4.2.Les méthodes de changement

Les méthodes de changement sont les actions menées par les responsables pour faire face au changement (Al-Haddad and Kotnour, 2015). Elles se séparent en deux grandes catégories : les méthodes de changement systématique et les méthodes de gestion du changement. Les méthodes de changement systématique impliquent un certain nombre d'outils et de processus pour aider l'équipe de direction à prendre une série de décisions concernant le fait de lancer, poursuivre ou clôturer des actions (Zook, 2007). Parmi les processus mis en œuvre, nous retrouvons : analyser et diagnostiquer la situation de départ, préparer et communiquer le changement, mettre en œuvre et inculquer les nouveaux changements. A ce niveau, beaucoup d'auteurs ont développé des méthodes de changement systématique. (Al-Haddad and Kotnour, 2015) les identifient et en détaillent les principales.

De l'autre côté, les méthodes de gestion du changement s'avèrent plus conceptuelles que celles précédemment décrites. Elles abordent les changements à grande échelle et mettent à contribution des outils et pratiques issues des théories du management, de la sociologie et des technologies de l'information (Worren et al., 1999). En résumé, en sensibilisant et en créant une vision qui implique le personnel dans le changement, ces méthodes aident la direction à aligner les initiatives de changement avec les missions et la stratégie de l'entreprise (Grover, 1999). Dans ce cas, plusieurs auteurs ont développé différentes méthodes. (Al-Haddad and Kotnour, 2015) identifient six méthodes (Kotter, 1996), (Hamel, 2000), (Luecke, 2003), (Judson, 1991), (Kanter et al., 1992), (Lewin, 1946) sur lesquelles nous nous baserons pour identifier les principaux éléments et facteurs clés de succès. Le tableau suivant regroupe les principales étapes dont l'ordre d'apparition peut varier selon les auteurs. Le tableau 7, permet d'identifier trois grandes phases dans un projet de changement :

- La première phase d'analyse dont l'objectif est de comprendre la situation de l'entreprise et d'identifier les problèmes et les solutions. Les solutions retenues permettront de définir une vision et une direction commune dans laquelle chaque employé concerné par le changement puisse s'engager.

- La deuxième phase de développement des solutions dont l'objectif est d'enclencher la dynamique de changement au sein de l'entreprise et ce, au moyen d'étapes essentielles : identifier et soutenir le leadership, communiquer et obtenir des victoires rapidement.
- La troisième phase de consolidation qui consiste à mettre en œuvre et déployer largement les solutions au sein de l'entreprise. A ce niveau, l'impact des solutions est évalué et les solutions sont ajustées en conséquence afin de les intégrer de manière pérenne au fonctionnement quotidien de l'entreprise.

Principales étapes	**Références associées**
Analyser et identifier les problèmes et les solutions	(Judson, 1991), (Luecke, 2003) et (Kanter et al., 1992).
Etablir un plan pour le changement et créer une vision	(Hamel, 2000), (Luecke, 2003), (Kotter, 1996) et (Kanter et al., 1992).
Créer un sentiment d'urgence	(Kotter, 1996) et (Kanter et al., 1992).
Identifier et soutenir le leadership	(Kotter, 1996), (Luecke, 2003), (Kanter et al., 1992) et (Hamel, 2000).
Communiquer	(Hamel, 2000), (Luecke, 2003), (Kotter, 1996) et (Kanter et al., 1992).
Prévoir et créer des « victoires » à court terme	(Kotter, 1996) et (Hamel, 2000).
Institutionnaliser le changement et ajuster la stratégie	(Kanter et al., 1992), (Judson, 1991), (Luecke, 2003) et (Kotter, 1996)

Tableau 7: Synthèse des principales étapes des méthodes de management du changement

4.3.Synthèse sur la conduite du changement

Le taux d'échec des transformations de la maintenance (70%) au sein des entreprises est intrinsèquement lié à la notion de changement - et non propre à la fonction maintenance - puisque communément, 70% des initiatives de changement des entreprises échouent (Balogun and Hope-Hailey, 2008; Beer and Nohria, 2000). Fort de ce constat, nous avons essayé de comprendre et d'identifier les principales solutions existantes permettant de réussir la conduite du changement. A partir de la littérature nous avons identifié les trois principaux aspects constituant les stratégies globales de changement : le contenu, les personnes et l'infrastructure de pilotage du changement. Aligner ces trois aspects permet de réussir le changement. Pour y parvenir de nombreux auteurs identifient les catalyseurs appropriés qui permettent d'augmenter des chances de réussite des initiatives de changement. A ce niveau, ils insistent tout particulièrement sur l'importance de la dimension humaine dans la conduite du changement.

Les méthodes de changement présentes dans la littérature utilisent ces catalyseurs et proposent différents phasages à suivre pour réussir le changement. Nous en avons identifié trois dans un projet de changement : la phase d'analyse, celle de développement des solutions et la phase de consolidation.

5. Synthèse de l'état de l'art

A travers cet état de l'art, nous avons pu explorer les principales solutions d'optimisation de la maintenance, et les moyens nécessaires à leur application dans un contexte industriel. Pour bien comprendre les enjeux qui l'entourent, nous avons commencé par définir la maintenance et analyser les termes qui la composent. Il apparaît que la maintenance est une fonction essentielle dans le bon fonctionnement des entreprises industrielles, et contribue fortement à l'atteinte des objectifs stratégiques. Elle ne se résume pas uniquement à des enjeux techniques, mais englobe aussi des aspects logistiques, administratifs, humains et organisationnels, ce qui la rend d'autant plus complexe et difficile à maîtriser. Dans ce contexte, une notion importante a émergé : le management de la maintenance, qui permet de coordonner et mettre en œuvre les activités de maintenance pour répondre aux objectifs donnés. Il n'existe pas de solution universelle pour optimiser la maintenance, mais le management de la maintenance est confronté aux mêmes décisions concernant les orientations à donner aux activités de maintenance. Ces décisions – au nombre de cinq - définissent les grands champs d'optimisation de la maintenance dans lesquels s'intègrent les nombreux modèles d'optimisation de la maintenance. Ces derniers peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision puisqu'ils permettent aux différents responsables maintenance de prendre les décisions les plus adaptées à leurs situations pour optimiser la maintenance.

Plusieurs modèles d'optimisation de la maintenance sont proposés par la littérature, mais sont peu adaptés et difficilement applicables dans un contexte industriel en constante évolution, où les bases et prérequis nécessaires à leur application sont souvent absents. Définir et mettre en œuvre une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance, permettant de la maîtriser et la piloter tout en favorisant l'utilisation de modèles d'optimisation semble pertinent et nécessaire pour à la fois combler l'écart entre la théorie et les pratiques industrielles, et permettre aux entreprises de bénéficier pleinement des solutions d'optimisation de la maintenance existantes. Ainsi, les entreprises seraient guidées par une méthodologie leurs permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite l'optimiser de manière pérenne.

L'étude des solutions d'optimisation de la maintenance présentes dans la littérature montre que l'optimisation de la maintenance passe avant tout par l'augmentation de décisions prises à partir de faits traduits par des données (industrielles, économiques, etc.); cela souligne la nécessité de disposer d'un nombre de données suffisamment importantes et représentatives de l'outil de production et son environnement, pour alimenter les modèles d'optimisation de la maintenance. Cette condition - indispensable pour assurer la pertinence des résultats – est pour beaucoup d'entreprises difficilement réalisable, ce qui ne permet pas dans un premier temps d'appliquer les modèles quantitatifs dans un contexte industriel. Il semble plus pertinent de commencer par structurer certains concepts de maintenance autour d'une démarche d'amélioration continue pour à la fois optimiser la maintenance, et capitaliser les données nécessaires au pilotage de la maintenance et à l'utilisation future de modèles d'optimisation quantitatifs. Dans ce but, nous avons identifié les principales caractéristiques du management de la maintenance de manière à choisir et mettre en œuvre les concepts les plus pertinents permettant de structurer le management de la maintenance et de ce fait optimiser la fonction maintenance. L'analyse de la littérature a montré le rôle important des données d'exploitation (production et maintenance) pour les modèles d'optimisation de la maintenance – aussi bien quantitatifs que qualitatifs – et de manière générale pour l'industrie. Face à cela, les nouvelles technologies de l'information issues de l'industrie 4.0 offrent plusieurs solutions permettant une meilleure maîtrise des données, et de ce fait représentent un potentiel d'optimisation de la maintenance non négligeable. L'état de l'art a permis d'identifier les usages les plus susceptibles d'être mis en œuvre prochainement et ayant un impact important pour le fonctionnement de la maintenance. Enfin, la mise en œuvre de nouveaux modèles d'optimisation de la maintenance, et de nouvelles technologies dans un contexte industriel impacte fortement les habitudes de travail des équipes de maintenance, et entraîne des changements considérables. Pour s'assurer de l'adhésion des employés dans ce projet de transformation, et ainsi parvenir à optimiser la maintenance, nous avons identifié les principales caractéristiques et facteurs clés de la conduite du changement à prendre en compte dans le choix et l'ordre de déploiement des solutions d'optimisation. En utilisant ces caractéristiques, ajoutées aux différentes recommandations issues de la littérature, il est possible de faire évoluer le management de la maintenance d'une entreprise afin qu'il puisse maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite être en capacité de l'optimiser de manière pérenne.

Chapitre 2

Problématique et hypothèse de résolution

Chapitre 2 : Problématique et hypothèse de résolution

A partir du positionnement et des enjeux de la recherche, et au regard de l'état de l'art, nous présentons dans ce chapitre notre problématique de recherche ainsi que notre hypothèse de résolution. En se basant sur ces deux éléments, nous formalisons une méthodologie de transformation de la fonction maintenance, que nous présentons dans la dernière partie de ce chapitre.

I. Enoncé de la problématique de recherche

Notre constat à l'issue de l'état de l'art, permet d'identifier notre problématique de recherche. Nous le synthétisons ici en quatre points :

Premièrement, l'amélioration et l'optimisation de la fonction maintenance à l'échelle d'une entreprise, dépendent principalement des décisions prises par le management à l'égard de choix impactant le fonctionnement de la maintenance. Les différentes solutions d'optimisation de la maintenance, présentes dans la littérature scientifique, permettent de guider les managers face à ces choix. Elles constituent de véritables outils d'aide à la décision. Cependant, de nombreux modèles d'optimisation s'appuient sur un nombre important de données dont ne disposent pas (ou partiellement) les entreprises, ce qui rend ces solutions difficilement applicables dans un contexte industriel. L'enjeu, pour le management et son organisation, est de disposer d'informations pertinentes et de qualité sur lesquelles s'appuyer pour prendre les meilleures décisions.

Deuxièmement, les nouvelles technologies de l'information permettent de collecter de nombreuses données industrielles, et ainsi de caractériser l'état de santé des équipements et l'historique de leurs pannes et interventions. Cela offre un meilleur niveau de connaissance des installations aux managers, et contribue de ce fait à améliorer leurs décisions vis-à-vis des activités de maintenance. L'apport de ces nouvelles technologies pour l'industrie offre un potentiel d'optimisation de la maintenance non négligeable. Pour autant, leur mise en œuvre nécessite des moyens financiers importants, ainsi que la mise en place de certains prérequis organisationnels. Toute la question est de réussir à intégrer ces nouvelles solutions technologiques dans le fonctionnement de la maintenance.

Troisièmement, appliquer des modèles d'optimisation de la maintenance et / ou des nouvelles technologies à une organisation existante, nécessite de faire évoluer les habitudes de travail et de transformer l'organisation en place. De manière générale, il n'existe pas une organisation universelle optimale de la maintenance. En revanche, les activités de maintenance doivent être organisées autour d'un processus définissant les principales fonctions de la maintenance. Les approches globales d'optimisation de la maintenance inscrivent les processus maintenance dans une démarche d'amélioration continue.

Quatrièmement, dans un contexte d'entreprise d'envergure et complexe il n'y a pas de méthodes disponibles, guidant le management de la maintenance pour améliorer la fonction maintenance dans sa globalité, et au regard des opportunités liées aux nouvelles technologies.

La problématique de notre recherche peut alors être résumée autour d'une question centrale que nous formulons de la manière suivante :

Comment faire évoluer les entreprises d'envergure pour améliorer leur fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques ?

Le terme « **faire évoluer** », implique la notion de transformation, et la nécessité d'accompagner les entreprises dans ce changement en vue d'améliorer la fonction maintenance. Les « **entreprises d'envergure** » désignent les entreprises industrielles de taille intermédiaire et supérieure, avec la particularité d'avoir plusieurs sites de production. Nous privilégions le verbe « **améliorer** » au verbe « optimiser » car par nature il est difficile de définir un optimum au départ d'une démarche de progrès de la maintenance. La « **fonction maintenance** » fait référence à l'ensemble des activités de maintenance. Elle englobe ainsi les dimensions économiques, managériales et techniques de la maintenance. Enfin, nous désignons par « **nouveaux apports technologiques** » les solutions d'amélioration de la maintenance, engendrées par l'émergence des nouvelles technologies et regroupées sous le terme *maintenance 4.0*.

Notre état de l'art nous a fourni plusieurs pistes pour répondre à cette question. Nous avons ainsi pu identifier une hypothèse de résolution à cette problématique.

II. Hypothèse de résolution

Pour améliorer de manière pérenne la fonction maintenance d'une entreprise, nous pensons qu'il est nécessaire que le management de la maintenance soit capable – dans un premier temps – de maitriser et de piloter la fonction maintenance. Pour y parvenir, le management doit disposer des outils (techniques, méthodiques et organisationnels) adaptés à son environnement, lui permettant de susciter la remontée des bonnes informations, et de prendre une décision sur cette base.
Nous retenons alors l'hypothèse suivante :

Formalisation d'un modèle managérial global de la fonction maintenance

En proposant cette hypothèse de résolution, nous nous adressons essentiellement aux managers de la maintenance. Cela implique d'avoir une approche d'ensemble vis-à-vis de la fonction maintenance. De ce fait, le modèle managérial proposé doit prendre en compte plusieurs aspects de la maintenance.

Premièrement, la dimension économique de la maintenance. Les coûts de maintenance représentent une part importante des dépenses en exploitation des entreprises industrielles, ce qui en fait un enjeu stratégique. Notre modèle managérial global doit ainsi permettre d'améliorer la performance économique de la fonction maintenance.

Deuxièmement, la dimension technique de la maintenance. L'évolution des nouvelles technologies entraîne la création de nouvelles techniques (ex : maintenance prévisionnelle) offrant à la maintenance un potentiel d'amélioration important notamment dans ses méthodes. Le modèle managérial proposé doit permettre à l'entreprise de bénéficier de ces évolutions.

Troisièmement, la dimension humaine de la maintenance. La fonction maintenance au sein des entreprises est assurée par des équipes composées de femmes et d'hommes. La mise en place d'un nouveau modèle managérial pour cette fonction induit des changements dans les activités quotidiennes ainsi que les compétences requises. Notre modèle managérial doit intégrer la dimension humaine afin d'anticiper et de faciliter les changements nécessaires à tous les niveaux du processus maintenance.

La prise en compte de ces trois aspects guide le choix des outils et des méthodes à mettre en œuvre pour dans un premier temps, maîtriser et piloter la fonction maintenance, puis dans un second temps, l'améliorer.

III. Proposition d'une méthodologie globale

A travers cette troisième partie du chapitre, nous présentons la méthodologie d'évolution de la fonction maintenance et les phases qui la composent. Chaque phase étant constituée de plusieurs étapes, nous détaillerons leurs objectifs respectifs, la logique qui les relie, ainsi que les raisons qui nous ont amenées à les intégrer à la méthodologie.

1. Présentation générale de la méthodologie

L'objectif de notre méthodologie est d'offrir au management les outils lui permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance, pour dans un second temps en améliorer la performance économique. Afin d'octroyer une dimension universelle à notre méthodologie, nous considérons le processus générique – identification du travail, préparation du travail, ordonnancement du travail, et exécution du travail – proposé par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995), autour du quel organiser les activités de maintenance. Chaque entreprise, pourra ainsi adapter son organisation de la maintenance à partir de ce processus (Crespo Marquez and Gupta, 2005). Dans cette optique, les outils d'amélioration de la maintenance proposés dans notre méthodologie s'intègrent à ce processus. Pour faciliter leur mise en œuvre dans un contexte industriel, et accompagner les changements qui en découlent, nous nous inspirons des méthodes d'accompagnement au changement, et structurons notre méthodologie en trois phases :

- Une première phase d'analyse de la fonction maintenance,
- Une deuxième qui consiste à concevoir et adapter les outils d'optimisation de la maintenance, puis,
- Une dernière phase de mise en œuvre et de pilotage.

Notre méthodologie étant conçue pour améliorer la performance de la maintenance, nous nous inspirons de l'approche proposée par (Vanneste and Van Wassenhove, 1995), et distinguons lors des phases d'analyse et d'optimisation l'efficacité de l'efficience. Cela permet aux équipes de maintenance d'identifier et de comprendre plus facilement la finalité des outils mis en œuvre.

Enfin, nous orientons le management de la maintenance vers une dynamique d'amélioration continue afin qu'il puisse capitaliser sur son expérience, et de ce fait améliorer la maintenance. Nous obtenons alors la structure globale ci-dessous (figure 30) :

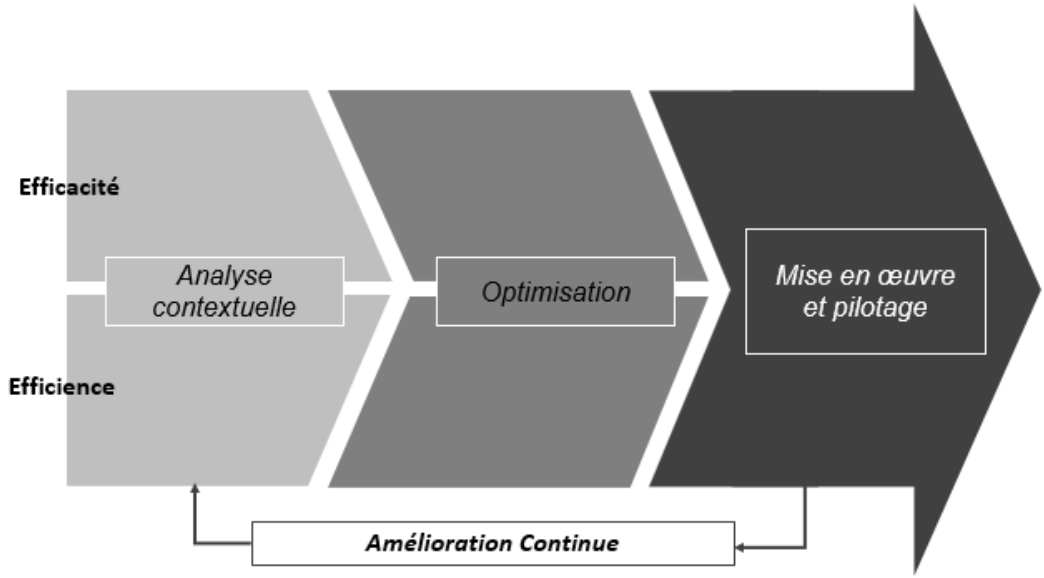


Figure 30: Structure globale de la méthodologie

La méthodologie – présentée plus en détails en figure 31 – est destinée à accompagner les entreprises désireuses d'améliorer leur fonction maintenance dans une perspective de digitalisation et, s'adresse essentiellement aux managers de la maintenance et aux responsables d'usine. De ce fait, elle doit tenir compte des contraintes et des spécificités des entreprises. A ce titre, la première phase permet de comprendre les objectifs de l'entreprise et d'identifier comment ils se traduisent pour les activités quotidiennes de maintenance, en analysant – aussi bien globalement que localement - la stratégie de maintenance et son exécution au sein de l'entreprise. Cette analyse cherche également à caractériser le fonctionnement de la maintenance à l'instant To pour le comparer aux meilleures pratiques du secteur industriel concerné et ainsi, montrer l'existence (ou l'inexistence) d'un potentiel d'optimisation de la maintenance au sein de l'entreprise. La première phase se termine par la consolidation - voire la création - des outils et des règles de collecte d'informations nécessaires pour à la fois affiner l'analyse initiale et préparer la mise en place des outils d'optimisation de la maintenance. La phase suivante utilise les résultats des analyses précédentes pour adapter les outils d'optimisation de la maintenance - proposés dans la méthodologie – aux besoins et contraintes de l'entreprise. Cette phase est cruciale dans la méthodologie car, au-delà du simple fait d'apporter des outils d'optimisation à l'entreprise, elle permet d'associer et d'intégrer les employés à la démarche d'évolution et de changements des pratiques, pour ainsi créer

l'engouement nécessaire à la mise en œuvre pérenne des solutions d'amélioration de la maintenance. La troisième phase consiste à déployer les solutions sur l'ensemble de l'entreprise et à s'assurer de leur pertinence. Cela nécessite certains aménagements organisationnels et la mise en place d'indicateurs. La fonction maintenance est alors maîtrisée et pilotable par les responsables maintenance et/ou directeurs d'usines, ce qui permet de l'optimiser dans une démarche d'amélioration continue.

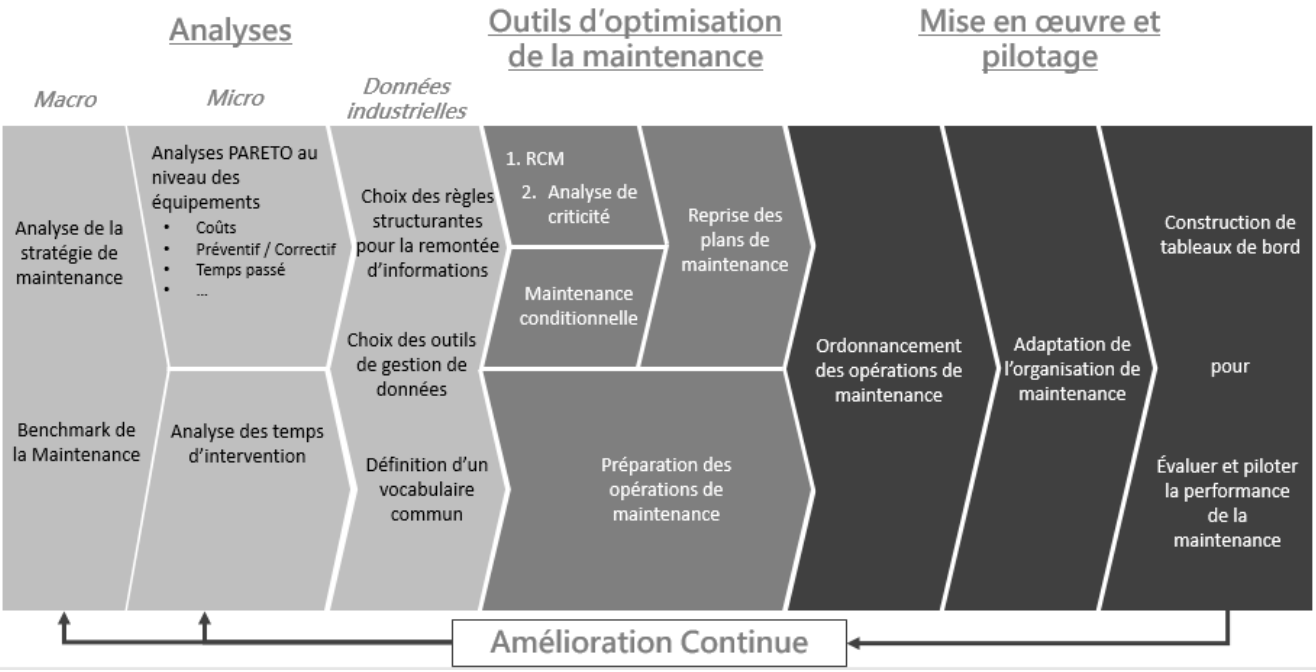


Figure 31: Présentation globale de la méthodologie

2. Première phase de la méthodologie : analyses de la fonction maintenance

Notre méthodologie débute par une phase d'analyses avec pour ambition de clarifier les objectifs de l'entreprise, de comprendre et caractériser le fonctionnement de la maintenance, ainsi que d'identifier les possibles solutions aux problèmes. Pour y arriver, nous nous appuyons sur des outils issus de la littérature que nous structurons de manière à contourner les principales difficultés pour mesurer efficacement la performance d'une fonction aussi complexe que la maintenance. Nous découpons alors cette première phase en trois étapes, reprises en figure 32.

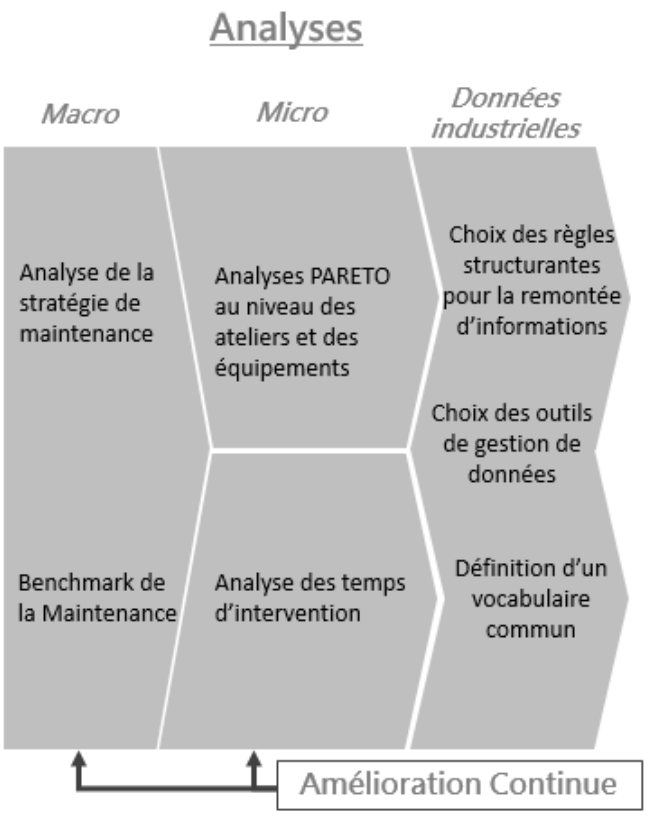


Figure 32: Première phase de la méthodologie: analyses de la fonction maintenance

2.1.Analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale

Cette première étape doit nous permettre à la fois de dresser un état des lieux du fonctionnement global de la maintenance, et d'identifier les domaines problématiques. En considérant la représentation de la maintenance proposée par (Visser, 1998) – figure 15 – qui décrit la fonction maintenance tel un processus de transformation avec des données d'entrée et de sortie, nous pouvons résumer l'objectif de cette étape en trois points :

- ***Identifier les données d'entrée***, pour caractériser la maintenance et son périmètre, mais aussi comprendre ses enjeux.
- ***Estimer les données en sortie***, pour évaluer la performance de la maintenance et connaître dans quelles mesures elle atteint ses objectifs.
- ***Analyser le processus maintenance***, pour comprendre le fonctionnement interne de la maintenance, et identifier les aspects à améliorer.

Pour atteindre ces objectifs, nous utilisons les audits de maintenance et les benchmarks.

L'audit de maintenance est un examen du système de maintenance visant à vérifier que la gestion de la maintenance permet de remplir sa mission, d'atteindre ses buts et objectifs, de suivre des procédures appropriées et de gérer les ressources de manière efficace et efficiente (Kumar et al., 2013). Il est généralement effectué sur place et permet de parcourir les principaux éléments de la maintenance. (Zancolich, 2002) décrit les principales étapes d'un audit maintenance :

- Interviewer les personnes clés de l'organisation ;
- Effectuer des visites sur site ;
- Cartographier les missions de la maintenance ;
- Passer en revue les documents propres à la maintenance ;
- Assister aux réunions principales ;
- Valider les performances des installations ainsi que celles de la maintenance.

A partir de la littérature, nous distinguons deux catégories d'audit pour la maintenance. La première repose sur le principe qu'il existe un standard décrivant la forme optimale de la maintenance. Elle englobe des audits génériques permettant d'évaluer et de comparer de manière uniforme le fonctionnement de la maintenance d'une entreprise aux standards ; à savoir, ce que devrait être un « bon système de maintenance ». Ces approches supposent que les standards peuvent s'appliquer de manière universelle afin d'améliorer la performance de la maintenance. De ce fait elles ignorent les spécificités des entreprises – en particulier l'environnement de production – ce qui limite leur pertinence.

La deuxième catégorie d'audits de maintenance tient compte des contraintes propres aux entreprises. Ce facteur permet de nuancer - compte tenu des attributs de l'entreprise - l'importance relative de certains standards. En revanche, ces analyses restent subjectives et, très peu de cas d'application sont présents dans la littérature.

Les benchmarks offrent un référentiel commun d'indicateurs pour comparer les performances des entreprises. Issus dans un premier temps des *World Class Manufacturing*, ils permettent de quantifier le niveau des bonnes pratiques de maintenance - *World Class Maintenance level*. Aujourd'hui, la plupart de ces indicateurs figurent dans la norme européenne (NF-EN-15341, 2007b) que nous avons présentée dans l'état de l'art. Parmi ces indicateurs, six sont globalement acceptés et utilisés par les entreprises (Maskell, 1991) :

MTBF[10] ; MTTF[11] ; MTTR[12] ; la disponibilité ; les coûts de maintenance divisés par le chiffre d'affaire de l'entreprise, et les coûts de maintenance divisés par les coûts de remplacement des installations. Le deuxième avantage des benchmarks est qu'ils établissent - pour chaque indicateur proposé – les valeurs à atteindre. De ce fait ils donnent un sens aux indicateurs et représentent de véritables cibles pour les entreprises. Cependant, comme le soulignent (Kumar et al., 2013), déterminer ces « valeurs idéales » n'est pas toujours évident, et varie selon les secteurs industriels.

Fort de ces éléments, nous proposons d'utiliser dans un premier temps un ensemble de questionnaires pour réaliser un audit de la maintenance. Ils permettent d'associer dès le départ les équipes de maintenance à la démarche d'amélioration et de changement. Ces questionnaires servent de support pour interviewer les acteurs clés dans le fonctionnement de la maintenance et permettent de structurer les échanges. La finalité de cet audit est d'identifier les valeurs d'entrée et de sortie de la fonction maintenance, ainsi que de caractériser le processus maintenance mis en œuvre. A partir des principaux audits présents dans la littérature (Groote, 1995; Kaiser, 1991; PricewaterhouseCoopers, 1999; Westerkamp, 1992; Wireman, 2015), nous identifions un ensemble de thématiques à aborder que nous répartissons en trois questionnaires (Tableau 8).

	Fonction maintenance	**Management de la maintenance**	**Gestion patrimoniale**
Thématiques abordées	• Périmètre de la maintenance • Objectifs de la maintenance • Budget de la maintenance • Politiques de maintenance mises en œuvre • Démarches récentes d'optimisation de la maintenance	• Définition et suivi d'indicateurs maintenance • Relation production/maintenance • Pratiques de maintenance • Sécurité des interventions • Recrutement et compétences • Mutualisation des équipes • Gestion documentaire	• Définition et valorisation du patrimoine • Politique de gestion patrimoniale mise en œuvre • Projets d'investissement futurs
Ordres de Grandeurs recherchés	• Coûts annuels de maintenance • Tailles des effectifs de maintenance • Capacité de production • Budget d'exploitation	• Nombre mensuel d'opérations de maintenance réalisées • Ratio Préventif / Correctif • Temps moyens entre pannes • Disponibilité	• Coûts de remplacement des installations • Rentabilité du plan de renouvellement (TCO*, ROCE**, ROI***)

*Total Cost of Ownership – Coût global de possession
**Return On Capital Employed – Rentabilité des capitaux investis
*** Return On Investment – Retour sur investissement

Tableau 8: Thématiques abordées par les trois questionnaires de l'audit maintenance

Le premier – *Fonction maintenance* – consiste à contextualiser la fonction maintenance au sein de l'entreprise. A ce niveau nous cherchons à comprendre le rôle de la maintenance dans l'entreprise, sa place et son impact (notamment financier). Nous devons également mettre en

[10] Mean Time Between Failure : Temps moyen entre pannes
[11] Mean Time To Failure : Temps moyen de fonctionnement avant panne
[12] Mean Time To Repair : Durée moyenne de réparation

évidence les grandes caractéristiques de la maintenance telles que ses coûts annuels et la taille de ses effectifs, ainsi que des caractéristiques plus globales de l'entreprise comme le budget de fonctionnement ou la capacité de production. Le deuxième – *Management de la maintenance* – nous plonge au cœur de la gestion quotidienne de la maintenance. Il permet de comprendre son fonctionnement et d'avoir une vision claire des principaux enjeux. Cet échange permet également d'identifier le niveau de satisfaction de l'entreprise vis-à-vis de la maintenance. A ce titre, il importante d'identifier les indicateurs de performances utilisés, ou du moins, de recueillir les informations nécessaires pour caractériser le niveau de performance actuel de la maintenance. Enfin, le troisième – *gestion patrimoniale* – élargit le périmètre de la maintenance à l'ensemble du cycle de vie des installations pour comprendre comment l'entreprise appréhende cet aspect.

Les thématiques identifiées garantissent une couverture des différents aspects de la maintenance lors des phases d'échanges avec les employés. Véritables lignes directrices, elles offrent une flexibilité aux questionnaires, leurs permettant de s'adapter plus facilement au contexte de l'entreprise. Ainsi, le choix des questions retenues tient compte du contexte de l'entreprise et veille à couvrir les différentes thématiques.

Une fois les trois questionnaires constitués, la phase d'échanges avec les personnes clés de l'organisation peut débuter pour réaliser ainsi l'audit de la maintenance. La figure ci-dessous (figure 33) synthétise les étapes de l'audit de maintenance.



Figure 33: Formalisation des étapes de l'audit maintenance

Les ordres de grandeur obtenus constituent les fondements de l'analyse par benchmark. D'une part, ils permettent d'identifier les entreprises pertinentes avec lesquelles parangonner, et d'autre part ils offrent de réels points de comparaison pour identifier objectivement les potentiels d'optimisation. Ils permettent de construire plusieurs indicateurs. Une première série pour caractériser la position de la fonction maintenance eu sein de l'entreprise :

- $\frac{Coûts\ de\ maintenance}{Capacité\ de\ production}$

- $\frac{Coûts\ de\ maintenance}{Budget\ d'exploitation}$
- $\frac{Coûts\ de\ maintenance}{Chiffre\ d'affaire}$
- $\frac{Coûts\ de\ maintenance}{Valeurs\ de\ remplacement\ des\ installations}$
- $\frac{Effectifs\ maintenance}{Effectifs\ globaux\ de\ l'entreprise}$

Puis une seconde pour caractériser davantage le fonctionnement de la maintenance :

- Disponibilité des installations ;
- Nombre mensuel d'opérations de maintenance réalisées ;
- Temps moyens entre pannes ;
- Ratio entre maintenance préventive et maintenance corrective.

Ces indicateurs qualifient l'état de la maintenance à l'instant To et établissent le niveau de référence de l'entreprise. En les comparant avec ceux issus d'entreprises du même secteur d'activité, nous identifions rapidement l'existence d'un potentiel d'optimisation pour la maintenance. Ils quantifient la marge de progression réalisable par l'entreprise et permettent une prise de conscience commune par les employés quant à la nécessité d'améliorer la performance de la fonction maintenance. De plus, dans une démarche d'amélioration continue ces indicateurs permettent de mesurer de façon globale les progrès effectués.

Pour identifier les actions d'amélioration à mettre en œuvre, ainsi que les aspects et pratiques de maintenance améliorer, nous utilisons comme outil de benchmark le questionnaire d'audit maintenance proposé par (Wireman, 2015). Cet outil est utilisé comme référence dans de nombreux articles (Fredriksson and Larsson, 2012). Il s'agit d'un questionnaire à choix multiples divisé en seize parties composées de dix questions chacune. Chaque partie aborde un aspect spécifique de la maintenance et l'évalue sur une échelle de zéro à quarante points. La figure 34 représente, par partie, la moyenne des résultats obtenus par Terry Wireman auprès de plus de 1200 entreprises du secteur manufacturier (Wireman, 2015).

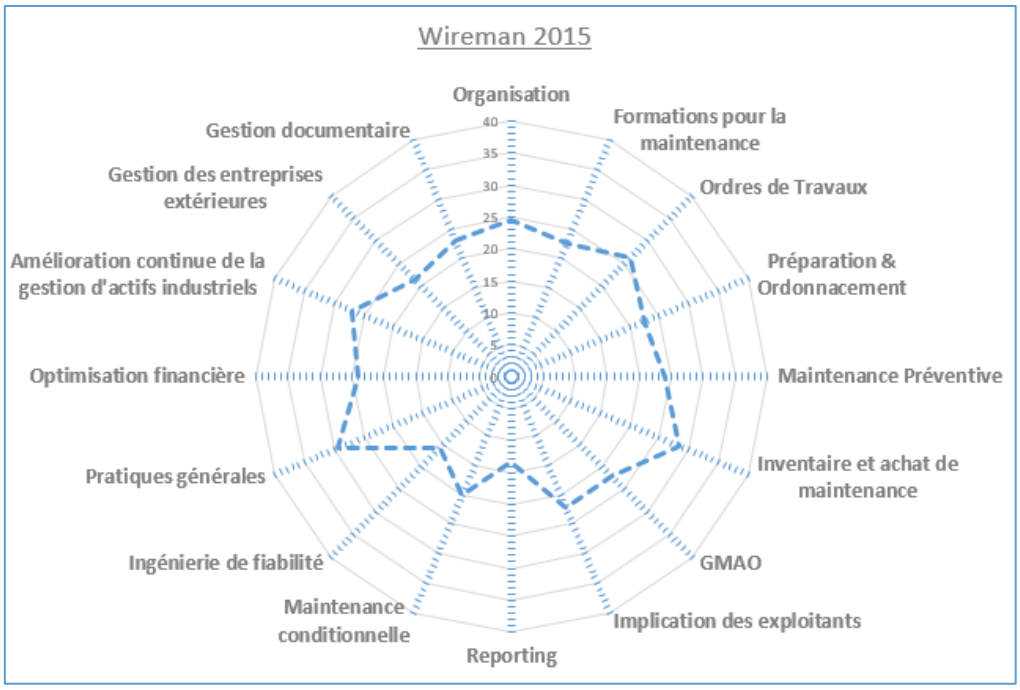


Figure 34: Résultats du Benchmark proposé par (Wireman, 2015)

En plus de proposer pour chaque partie un niveau de référence issu de l'industrie, ce questionnaire couvre aussi bien les aspects propres à la maintenance que globaux, liés à la gestion d'actifs industriels – *Asset Management*. L'utilisation d'un tel questionnaire permet une large diffusion auprès des entreprises du secteur industriel concerné pour en identifier les bonnes pratiques. Il offre ainsi un référentiel commun facilitant la comparaison entre différentes entreprises et permettant une analyse plus détaillée du fonctionnement de la maintenance dans son ensemble. Les résultats obtenus à l'aide de ce questionnaire contribuent à identifier et prioriser les aspects de la maintenance à améliorer.

Cette première étape d'analyse offre une compréhension globale du fonctionnement de la maintenance au sein de l'entreprise tout en associant les employés à la démarche d'amélioration. De plus, elle permet de définir l'existence d'un potentiel d'optimisation pour la maintenance et les principaux aspects à améliorer. A présent, une analyse plus spécifique doit être menée.

2.2.Analyse microscopique de la maintenance

A travers cette deuxième étape d'analyse, nous entrons dans le cœur du fonctionnement de la maintenance. Contrairement à la première, qui abordait la fonction maintenance de façon globale, cette deuxième étape s'effectue à l'échelle des usines et des ateliers de production. C'est à ce niveau que nous distinguons l'efficacité de l'efficience.

L'axe « ***efficacité*** » de notre méthodologie repose sur le principe de PARETO (Knights, 2001) : Règle observée selon laquelle environ 80 % des effets sont le produits de 20 % des causes. Ce principe est souvent utilisé pour la gestion des stocks, mais se vérifie également dans le domaine de la maintenance où nous chercherons à concentrer les ressources (temps passé, coûts) sur les 20 % d'équipements permettant d'obtenir 80 % de résultats. Ainsi, l'objectif de cette étape d'analyse est d'identifier où se concentrent les ressources de maintenance, c'est-à-dire comment la stratégie de maintenance mise en œuvre par l'entreprise se traduit localement. Pour y parvenir, nous classons – à partir du système de GMAO de l'entreprise – les équipements par ordre décroissant selon les coûts de maintenance et le temps passé. Pour chaque critère, nous distinguons deux catégories selon la nature des interventions de maintenance : les interventions de nature corrective, et celles de nature préventive. Le schéma ci-dessous (figure 35) illustre la forme des résultats obtenus via ce type d'analyse.

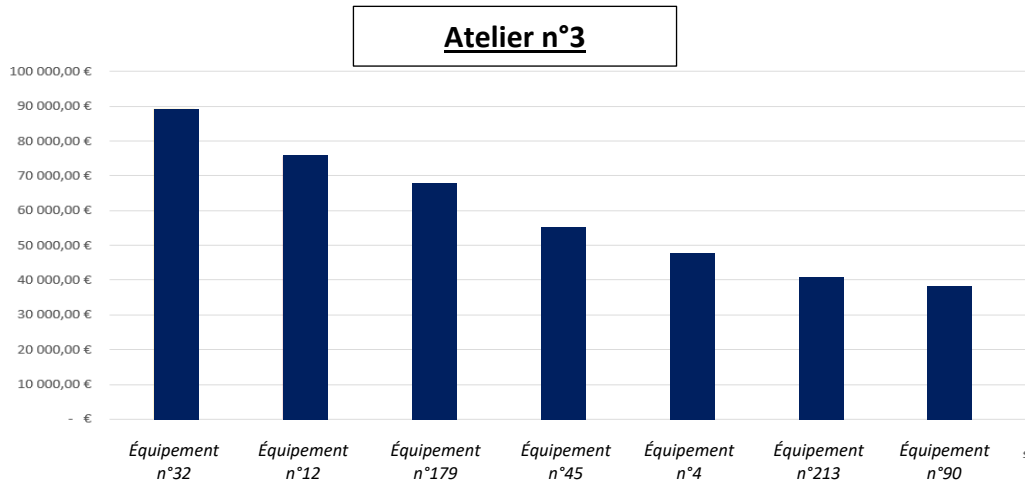


Figure 35: classement par ordre décroissant des coûts de maintenance des équipements d'un atelier – schéma de principe

Sur la base de ces résultats, des discussions sont menées avec les équipes de maintenance. L'objectif est de vérifier que le degré d'importance ou de vigilance accordé à certains équipements est en cohérence avec la répartition des ressources.

L'axe « ***efficience »*** de la méthodologie vise à augmenter, lors des interventions de maintenance, le temps passé « au pied de la machine » par les employés.

Généralement, nous distinguons trois temps lors d'une intervention de maintenance (figure 36):

- Les temps productifs – lorsque les employés sont « au pied de la machine » ;
- Les temps logistiques et d'organisation – permettant de préparer les interventions et de se rendre sur place ;

- Les temps perdus – souvent des temps d'attente.

La proportion de temps passé « au pied de la machine » par rapport à la durée globale de l'intervention est communément appelée le « *Wrench Time* » (Lister, 2012), et s'exprime en pourcentage. Selon (Wireman, 2015), la moyenne nationale – aux Etats-Unis – de cette valeur avoisine les 30 % et chute pour certaines organisations jusqu'à 20%. Par opposition, la valeurs optimale varie entre 50 et 55 % (Palmer, 2013).
L'objectif du deuxième axe de notre méthodologie est d'amener l'entreprise vers cette valeur optimale. En y parvenant, moins d'énergie et de temps seront nécessaires pour chaque opération, ce qui libérera des ressources pour réaliser davantage d'interventions de maintenance.

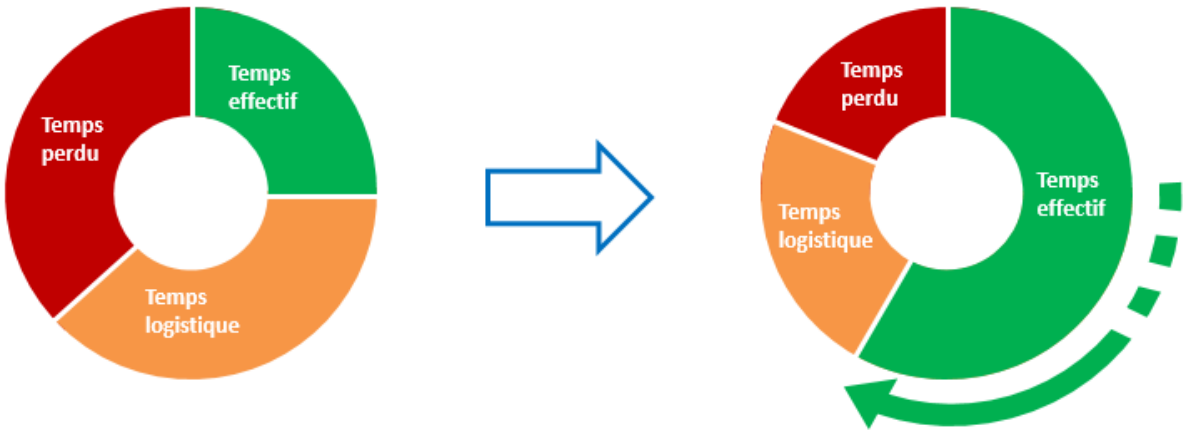


Figure 36: principe d'amélioration du « Wrench Time »

Pour cette étape d'analyse, les enjeux principaux sont de clarifier le fonctionnement opérationnel des équipes de maintenance, et d'identifier dans quelles mesures l'organisation de maintenance limite la présence des employés « au pied de la machine ». Par conséquent, l'objectif de cette étape d'analyse est double :

- Estimer le « *Wrench Time* » des équipes de maintenance de l'entreprise ;
- Identifier les points où les équipes de maintenance perdent du temps.

Pour y parvenir nous proposons d'utiliser la méthode de (Palmer, 2013) qui identifie plusieurs sous-catégories pour caractériser les temps perdus et les temps logistiques des interventions de maintenance ; le tableau 9 en regroupe les principales.

Catégories	
Temps effectif	Interférence
Déplacement	Briefing
Mise en place / rangement	Attente de l'exploitant
Attente matériels	Attente mise à disposition de l'équipement
Attente outils	Renseigner la GMAO
Attente instruction	Divers

Tableau 9: Principales catégories des temps d'intervention selon (Palmer, 2013)

La principale difficulté pour estimer le « Wrench Time » est d'éviter de donner le sentiment aux salariés d'être constamment surveillés. Pour cela, (Palmer, 2013) préconise une approche statistique qui repose sur un grand nombre d'observations et suppose que chacune d'elles représente la même durée. Il détaille cinq étapes :

- Informer les équipes et expliquer l'objectif de la démarche ;
- Définir les différentes catégories des temps d'intervention ;
- Déterminer une période représentative (exemple : éviter les périodes d'arrêts d'usine) ;
- Définir le nombre d'observations nécessaires pour limiter la marge d'erreur[13] ;
- Réaliser les observations sur le terrain.

Nous obtenons ensuite les résultats sous forme de diagrammes tels qu'illustrés sur la figure ci-dessous (figure 37). Cette approche permet d'estimer le « Wrench time » - dans cet exemple, celui de l'usine 1 est de 20 % tandis que celui de l'usine 3 est de 25 % - et aussi d'identifier les principales origines de perte de temps. Dans le cas précité, nous constatons que les employés passent une bonne partie de leur temps à attendre les pièces nécessaires pour leurs interventions.

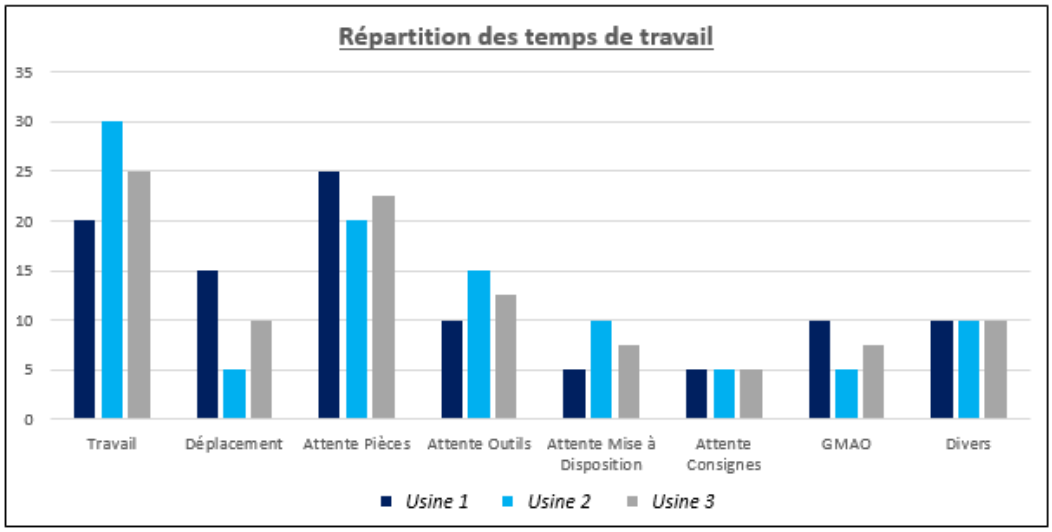


Figure 37: Exemples de répartition des temps de travail estimée à l'aide de l'approche de (Palmer, 2013)

[13] (Palmer, 2013) définit la formule suivante : Marge d'erreur = $k\sqrt{\frac{(1-p)p}{n}}$; k étant une constante, n le nombre d'observations ; et p la proportion d'observation.

Cette deuxième étape d'analyse offre une meilleure compréhension du fonctionnement de la maintenance, et met en exergue ses lacunes. Elle permet ainsi d'identifier les principaux points d'amélioration. Cependant, ces analyses reposent essentiellement sur des données issues des systèmes d'information de l'entreprise, en particulier la GMAO où la qualité des données influe fortement sur la pertinence de ces analyses.

2.3.Analyse de la qualité des données

Aujourd'hui, les données occupent une place importante au sein des entreprises et interviennent de plus en plus dans les processus décisionnels. Selon (Bokrantz et al., 2019) une des caractéristiques de la maintenance au sein de l'industrie 4.0 est d'augmenter les prises de décisions, en particulier celles basées sur des données. Pour (McKinsey & Company, 2018), l'enjeu essentiel lié à la donnée est de permettre aux dirigeants de prendre les meilleures décisions, le plus souvent possible. Notre méthodologie cherche à faire évoluer les organisations de maintenance pour qu'elles puissent répondre à cet enjeu. Par conséquent elle accorde une importance particulière à la qualité des données. (Jayawardene et al., 2013) identifient huit dimensions permettant de caractériser la qualité des données : la complétude, la conformité, la cohérence, l'exactitude, l'intégrité, la duplication, l'actualisation et l'accessibilité.

A ce niveau, l'ambition première est de s'assurer de disposer des données nécessaires à la mise en œuvre de la méthodologie et au bon fonctionnement de la maintenance. Pour cela, nous décomposons cette étape en trois points :

- Premièrement, nous identifions les données à collecter. La pertinence et la qualité des résultats obtenus à travers les deux étapes précédentes reposent en grande partie sur la présence d'un certain nombre de données (temps d'occupation, coûts de maintenance, etc.). Ainsi, les ordres de grandeurs recherchés afin de construire les indicateurs clés de performance nécessaires pour caractériser la maintenance et conduire les benchmarks, permettent d'identifier une partie des données à collecter. L'autre partie s'identifie en anticipant les décisions auxquelles sont confrontées les managers de la maintenance. L'état de l'art a mis en évidence les principales décisions impactant la maintenance tout au long du cycle de vie des installations (figure 18 – chapitre 1 – III-2.1). Cela permet d'identifier les données nécessaires pour – selon le contexte de l'entreprise – apporter les réponses les plus adaptées, et améliorer la performance de la maintenance. Ce premier point veille à la complétude des données de maintenance.
- Deuxièmement, nous identifions les outils de gestion des données de maintenance et définissons un ensemble de règles d'utilisation. Bien qu'aujourd'hui les technologies

permettent d'automatiser la collecte de données, certaines doivent être renseignées manuellement par les employés dans les systèmes d'information (ex : les temps d'occupations pour les interventions de maintenance). Par conséquent, pour garantir la cohérence et la conformité des données – quelles que soient les personnes qui les renseignent - il est primordial d'éditer des règles communes pour renseigner ces systèmes d'informations. Cela passe par la mise en œuvre d'un groupe de travail avec les référents méthodes de maintenance et les administrateurs du système de GMAO de l'entreprise.

- Troisièmement, nous définissons un vocabulaire de maintenance commun à l'entreprise. Beaucoup de termes associés à la maintenance sont régulièrement utilisés de manière interchangeables dans la littérature (Velmurugan and Dhingra, 2015). Cela se vérifie également dans le milieu industriel où, selon les secteurs, le vocabulaire utilisé peut varier. L'objectif ici est de s'assurer qu'au sein de l'entreprise, chaque personne utilise les mêmes termes pour désigner les mêmes éléments et/ou actions et non de répandre les définitions universelles telles qu'identifiées dans l'état de l'art.

Cette troisième étape clôt la phase d'analyse de notre méthodologie et garantit les conditions nécessaires pour la mise en œuvre des étapes suivantes. La dimension humaine est au cœur des dynamiques de changement et, de ce fait, au centre de notre méthodologie. De plus, elle impacte fortement la qualité des données renseignées dans les systèmes d'information (Kumar et al., 2013). Comme le soulignent (Galar et al., 2011), l'implication des employés dans la collecte de données conduit à une meilleure fiabilité de ces dernières. En formalisant la finalité des données de maintenance, ainsi que les règles de renseignement des systèmes d'information, cette étape offre des outils pertinents pour impliquer les salariés dans le processus de collecte de données et en améliorer la qualité.

Synthèse de la première phase de la méthodologie

La première phase de la méthodologie permet d'analyser et de caractériser le fonctionnement de la maintenance au sein de l'entreprise. Elle commence par une étape d'audit global des pratiques de maintenance, combinée à un benchmark avec des entreprises du même secteur industriel. Elle se poursuit avec une analyse locale de la répartition et de l'utilisation des ressources maintenance puis, se termine par un état des lieux des données industrielles et des outils permettant leur gestion.
La réalisation de ces étapes permet non seulement, d'identifier le potentiel d'optimisation de la maintenance, mais aussi de structurer la remontée d'informations nécessaires à la mise en œuvre de la méthodologie.

3. Deuxième phase de la méthodologie : outils d'optimisation de la maintenance

Dans la deuxième phase du modèle (figure 38) nous construisons les outils d'optimisation selon les axes « efficacité » et « efficience » de la maintenance pour les intégrer ensuite dans le processus de maintenance – identification du travail, préparation du travail, ordonnancement du travail et exécution du travail – proposé par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995).

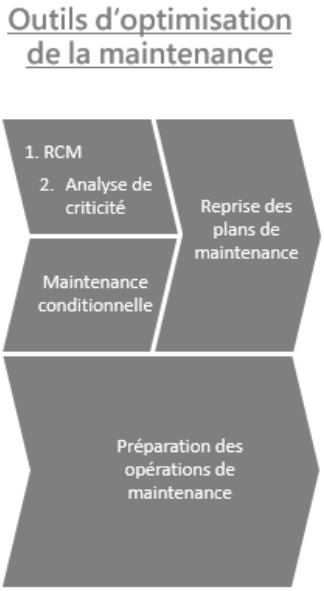


Figure 38: Deuxième phase de la méthodologie: Outils d'optimisation de la maintenance

3.1.Améliorer l'efficacité de la maintenance

L'objectif de cette étape est de structurer une approche commune à l'entreprise, lui permettant d'identifier le niveau de maintenance idéal à réaliser pour atteindre ses objectifs. En raison du caractère aléatoire de l'occurrence des pannes, le seul type de maintenance sur lequel nous pouvons directement agir est la maintenance préventive. Ainsi, fixer la juste quantité de maintenance à réaliser revient à définir la juste quantité de maintenance préventive à réaliser. Pour identifier le bon niveau de maintenance à réaliser, nous nous basons sur les préconisations des constructeurs et l'expérience des exploitants, auxquelles nous ajoutons deux outils (figure 39) : la maintenance conditionnelle et la fiabilité (la RCM ainsi que les analyses de criticité). Ces éléments seront ensuite intégrés dans la reprise des plans de maintenance.

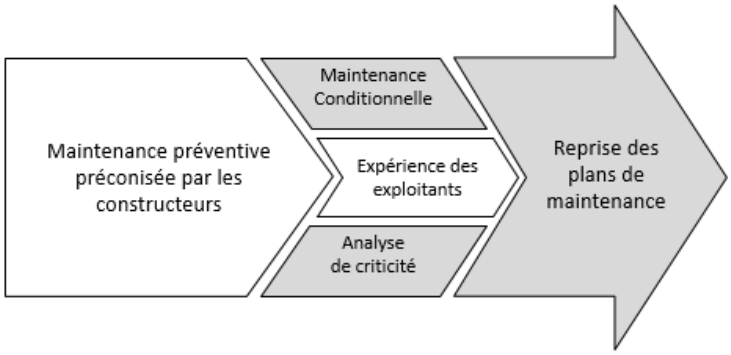


Figure 39: Prise en compte de la criticité et de la maintenance conditionnelle dans la reprise des plans de maintenance

Lors du déploiement de la méthodologie, les étapes liées à la fiabilité et à la maintenance conditionnelle peuvent être réalisées en parallèle. Ici, nous commencerons par présenter celle concernant la fiabilité.

En se basant sur les principes de *Reliability-Centered Maintenance*, nous proposons une approche en deux temps.

Premièrement, nous nous assurons que les installations sont suffisamment dimensionnées pour assurer leurs fonctions. Pour cela, nous déterminons la criticité des pannes potentielles à l'aide d'une Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC). La figure 40 illustre la finalité de cet outil au sein de notre méthodologie. Elle représente une matrice décisionnelle basée sur les deux critères définissant la criticité – fréquence d'occurrence et gravité de la panne. A partir des résultats de l'AMDEC, nous positionnons les pannes potentielles dans cette matrice et identifions les parties des usines où il importe de revoir la conception avant d'optimiser la maintenance (zone grise). Généralement, ces études sont réalisées lors de la phase de conception des installations industrielles, puis actualisées régulièrement selon l'évolution des installations. Dans notre méthodologie, nous les utilisons comme « garde-fou » pour s'assurer que les actions d'optimisation de la maintenance mises en œuvre par la suite ne dégraderont en rien le système de production. De plus, dans une démarche de conduite du changement, qui vise globalement à diminuer l'effort de maintenance, cela permet de rassurer les équipes de maintenance. Concrètement, ce premier outil permet d'évaluer la marge de manœuvre dont dispose l'entreprise pour optimiser la maintenance.

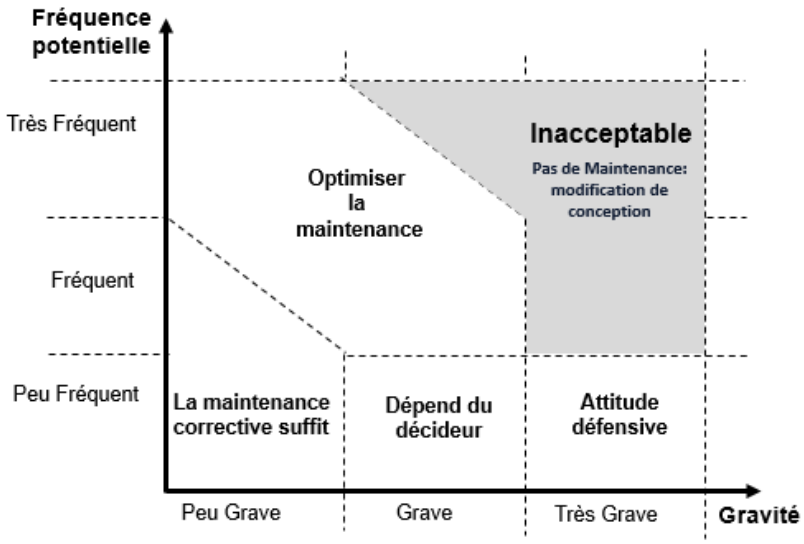


Figure 40: Grille de criticité

Deuxièmement, nous identifions les 20 % d'équipements où nous devons concentrer l'effort de maintenance pour atteindre 80 % du résultat. Pour cela, nous nous appuyons sur des analyses de criticité multicritères (Zwingelstein, 2015b). L'analyse de criticité permet de définir objectivement, au moyen d'une méthode participative, l'importance que chaque équipement revêt dans l'ensemble du processus dans lequel s'inscrit son utilisation, et de redéfinir les besoins de maintenance en conséquence. Elle s'appuie sur la connaissance tacite des entreprises, qu'elle collecte à travers plusieurs étapes structurées (Mungani and Visser, 2013). Les objectifs associés à la maintenance sont souvent multiples. Au-delà de la disponibilité des installations, l'aspect financier, peut peser notablement sur les objectifs. En fonction de ces derniers et de certains critères, un équipement peut être considéré comme critique. C'est pourquoi, il est nécessaire d'identifier la criticité des équipements par rapport aux objectifs de maintenance. Dans notre méthodologie, nous nous inspirons de la méthode proposée par (Lavina, 2005), qui utilise quatre critères – pannes, importance des équipements, état de l'équipement, taux d'utilisation – pour identifier trois niveaux de criticité. Cette méthode possède l'avantage d'être très simple de mise en œuvre et s'avère nécessaire quand les historiques de pannes sont indisponibles (Zwingelstein, 2014). A partir de cette méthode, les critères et leur pondération sont adaptés par un groupe d'experts de l'entreprise en fonction du contexte et des objectifs de la maintenance. Une fois la méthode d'analyse de criticité définie, il faut s'assurer qu'elle permet de discriminer environ 20 % d'équipements critiques et 80 % de non critiques et ce, en évaluant un ensemble d'équipements représentatifs du système de production. Une fois ce point vérifié, nous cotons l'ensemble des équipements. A ce stade, il est indispensable d'associer aussi bien les équipes de maintenance que celles de production. En effet, un des intérêts majeurs de mettre en place les analyses de criticité des équipements est

d'améliorer la relation production-maintenance. La cotation des équipements s'effectuera conjointement avec les services maintenance et production au travers de réunions pilotées par le service méthodes.

Définir la criticité d'un équipement permet de s'entendre sur les délais de remise en fonctionnement de l'équipement. Ainsi, la maintenance peut prioriser ses interventions et affecter spécifiquement ses ressources aux tâches. La criticité, est un point de départ objectif aux discussions entre la maintenance et la production qui permet de dédramatiser et de faciliter cette relation indispensable au bon fonctionnement de l'entreprise et d'arbitrer certaines situations complexes. La criticité, en impactant à la fois la gestion quotidienne de la maintenance et la suite du déploiement du modèle (figure 41), est la pierre angulaire de la méthodologie.

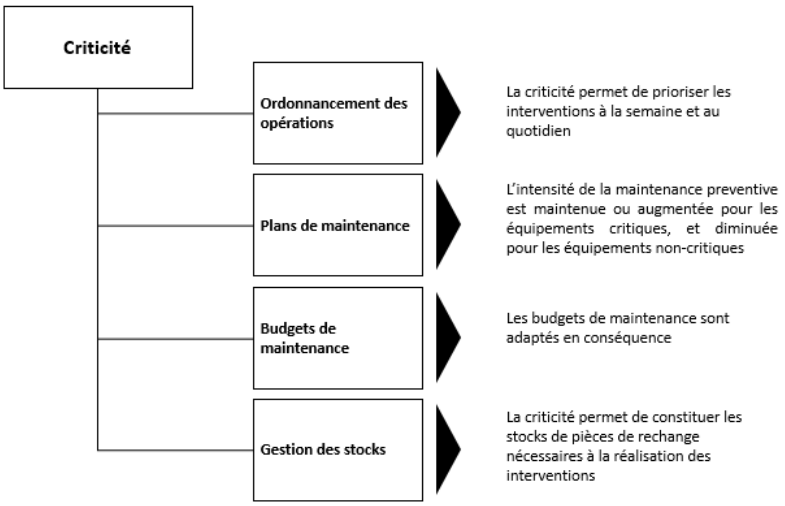


Figure 41: Impacts de la criticité dans la gestion quotidienne de la maintenance

Au quotidien, la criticité des équipements permet aux services maintenance et production de s'accorder sur les délais de remise en fonctionnement des équipements. Le tableau ci-dessous (tableau 10) donne, à titre d'exemple, les délais de remise en fonctionnement selon le niveau de criticité des équipements. Ce délai offre une marge de manœuvre aux équipes maintenance, qui se traduit par une priorité à donner aux interventions de maintenance.

Niveau de criticité des équipements	Intervention de maintenance corrective
Niveau 1	Prise en charge immédiate en lien avec l'exploitant pour remise en état dans les meilleurs délais
Niveau 2	Remise en état inférieure 3 semaines
Niveau 3	Remise en état inférieure à 9 semaine

Tableau 10: Délais de réalisation des opérations de maintenance corrective selon ne niveau de criticité des équipements

Pour pouvoir tenir les délais de remise en fonctionnement, les stocks des pièces détachées sont également adaptés en considérant les délais de réapprovisionnement. Dans la

suite du modèle, elle influencera l'étape d'ordonnancement des interventions de maintenance. Dans l'immédiat, nous adaptons l'intensité de maintenance en fonction de la criticité des équipements. Le tableau 11 illustre comment la périodicité des plans de maintenance préventive varie selon le niveau de criticité.

Niveau de criticité des équipements	Plan de maintenance préventive systématique
Niveau 1	Périodicité des interventions : conformes aux préconisations constructeurs
Niveau 2	Périodicité des interventions : élargie au juste nécessaire
Niveau 3	Périodicité des interventions : minimales en respect des réglementations

Tableau 11: Périodicité des interventions de maintenance préventive systématique selon le niveau de criticité des équipements

Nous utilisons un deuxième outil pour identifier le juste niveau de maintenance à effectuer et répondre aux objectifs : la maintenance conditionnelle. Grace aux évolutions technologiques, la recherche dans ce domaine a progressé rapidement et de nombreux cas d'application ont été publiés (Jardine et al., 2006). Dans notre méthodologie, nous considérons la mise en place de techniques de maintenance conditionnelle comme une révolution organisationnelle, puisque les opérations de maintenance préventive sont déclenchées selon un seuil, et non plus une date ou un temps de fonctionnement fixé à l'avance. Les techniques de maintenance conditionnelle, en devenant de plus en plus précises, permettent une meilleure surveillance des équipements et sont généralement déployées dans le cadre d'une démarche d'amélioration de la fiabilité des installations. Cependant, au sein de notre méthodologie, nous utilisons cet outil avant tout dans une démarche d'amélioration de la performance économique de la maintenance. De ce fait, nous commençons à mettre en place ces solutions sur des équipements où d'importantes opérations de maintenance préventive sont planifiées à court terme, plutôt que sur des équipements jugés essentiels pour la sureté de fonctionnement. Lorsque nous repoussons dans le temps ces opérations de maintenance, nous prenons alors un « risque mesuré », basé sur les résultats de la maintenance conditionnelle. L'objectif est d'arriver au juste niveau de maintenance, correspondant à un optimum technico-économique. La mise en place de la maintenance conditionnelle va, dans un premier temps, réduire considérablement les dépenses en maintenance préventive systématique et générer un gain économique (figure 42). Les opérations préventives initialement prévues seront décalées dans le temps pour être réalisées uniquement lorsque cela sera nécessaire (une fois le seuil franchit). A plus long terme, une étude de retour sur investissement viendra valider la viabilité

économique des solutions proposées, car dans certains cas le matériel de surveillances installés à demeure et les outils informatiques d'analyse nécessaires peuvent s'avérer couteux.

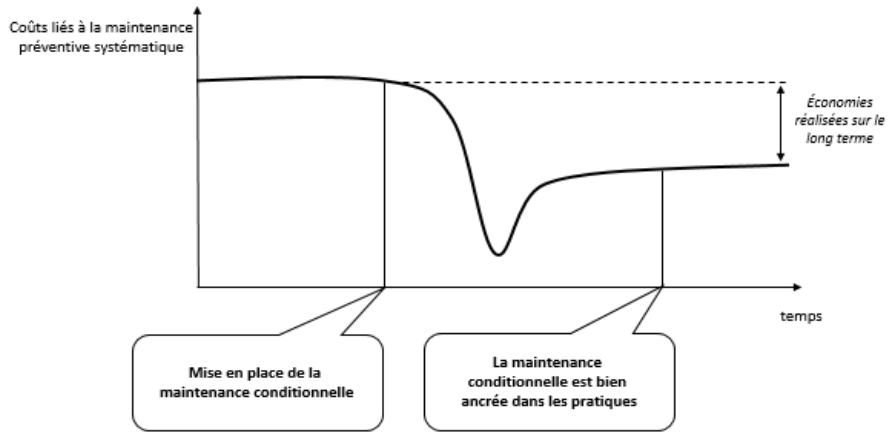


Figure 42: Evolution des économies suite à la mise en place de la maintenance conditionnelle

Le choix des techniques de maintenance conditionnelle (analyse de vibrations, analyse ultrasons, etc.) à mettre en œuvre se fait selon les spécificités des équipements et les compétences des équipes. La mise en œuvre de la maintenance conditionnelle permet d'obtenir rapidement un gain économique, ce qui représente un « *quick win* » essentiel à la réussite d'un projet d'accompagnement au changement (Kotter, 1996). De plus, cela permet de faire monter en compétence et de valoriser la fonction de maintenance pour tirer les équipes vers le haut en même temps que nous réduisons les moyens (donc les effectifs) affectés aux tâches de maintenance préventive systématique.

La maintenance conditionnelle et l'analyse de criticité contribuent à identifier le juste niveau de maintenance à réaliser pour atteindre les objectifs de la maintenance. Pour faciliter la mise en œuvre de la méthodologie, ces changements doivent être intégrés dans les plans de maintenance préventive en modifiant l'élément déclenchant les opérations de maintenance (temps ou valeur de seuil).

En raison du nombre important d'équipements et par conséquent de plans de maintenance préventive, il importe de prioriser l'étape de reprise des plans de maintenance. Pour y parvenir, nous identifions les équipements où la stratégie de maintenance est inadaptée, en reprenant les analyses de l'axe « efficacité », effectuées lors de la première phase de la méthodologie. Nous utilisons en particulier le classement par ordre décroissant des coûts de maintenance préventive des équipements que nous croisons avec la criticité fraîchement établie. La figure ci-dessous (figure 43) illustre le type de graphique obtenu.

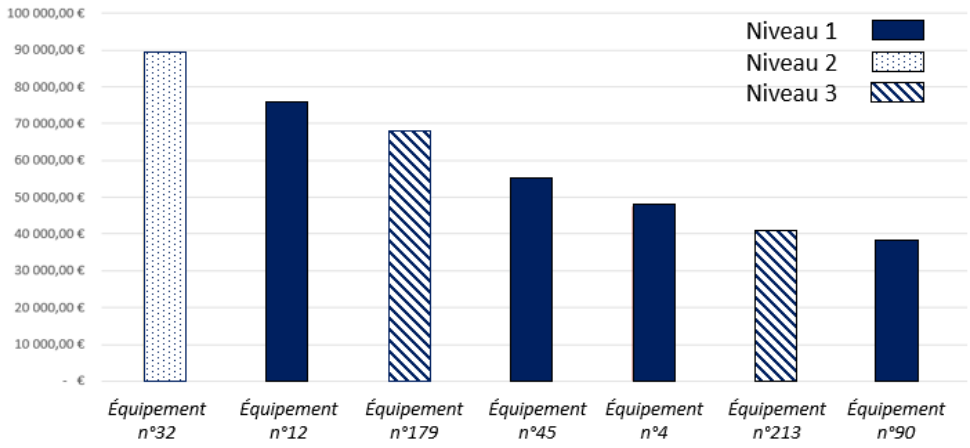


Figure 43: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance préventive des équipements d'un atelier croisé avec le niveau de criticité – schéma de principe

A partir de ces résultats, deux catégories d'équipements sur lesquels commencer la reprise des plans de maintenance se distinguent :

- Les équipements « non critique » (niveau 2 et 3 sur la figure 43) avec des coûts de maintenance préventive significatifs ;
- Les équipements « critique » (niveau 1 sur la figure 43) avec des coûts de maintenance préventive faibles.

Pour la première catégorie l'objectif est de diminuer si possible la fréquence des opérations préventives identifiées, ce qui implique – potentiellement – de réaliser moins d'opérations. Pour la seconde, il faut s'assurer de mettre les moyens nécessaires pour garantir le niveau de disponibilité de l'équipement souhaité ; donc potentiellement augmenter le nombre d'opérations préventives. Ce raisonnement vaut également pour le critère des temps d'intervention. La répartition des équipements (20% critiques et 80% non critiques) permettra globalement d'effectuer des économies tout en garantissant l'atteinte des objectifs fixés à la maintenance.

Ces plans de maintenance représentent les points de départ pour la préparation des interventions de maintenance. Ils doivent détenir l'ensemble des informations nécessaires à la bonne tenue des interventions. Ces informations sont identifiées au sein de l'étape de préparation de notre méthodologie. Ainsi, un travail sur la qualité de ces informations peut être nécessaire, et s'effectuera lors de la reprise des plans de maintenance.

3.2.Améliorer l'efficience de la maintenance

L'analyse des temps d'intervention a permis d'estimer le niveau d'efficience de la fonction maintenance et d'identifier les dysfonctionnements organisationnels. Cette étape consiste à définir les nouvelles règles de fonctionnement de la maintenance permettant d'en améliorer l'efficience. La solution proposée repose sur le constat réalisé par (Wireman, 2015)

selon lequel le « wrench time » moyen des entreprises avoisine 30 % alors qu'après optimisation, il peut atteindre 55%. Dans la situation non optimisée, plus de temps - donc plus de ressources - sont nécessaires pour réaliser la même quantité d'opérations. Pour atteindre ce niveau, nous nous basons sur les travaux de (Palmer, 2013) qui préconise la mise en place d'un nouveau poste : le préparateur. Cette personne interviendrait uniquement en amont des opérations, pour s'assurer que toutes les conditions pour la réaliser sont réunies et en aval, pour identifier les pistes d'amélioration. (Palmer, 2013) quantifie à 57 % l'amélioration de la productivité des employés grâce à la mise en place de ce nouveau poste. L'annexe 9 détaille et explique le raisonnement de (Palmer, 2013).

L'étape de préparation des interventions de maintenance, pourtant cruciale pour le bon fonctionnement du processus maintenance, est souvent négligée. Une préparation rigoureuse des interventions consiste à :

- Identifier le périmètre de l'intervention ;
- Décrire le travail à réaliser et les ressources nécessaires ;
- S'assurer que les conditions logistiques, identifiées comme nécessaires à la bonne tenue de l'opération soient réunies ;
- Actualiser ces informations une fois l'opération réalisée.

Les deux premiers points permettent de définir les conditions nécessaires à la bonne tenue des opérations de maintenance. Selon la nature des interventions –maintenance préventive ou corrective - deux cas de figure se présentent. Pour les interventions de maintenance préventive, ces informations sont prédéfinies dans les plans de maintenance associés aux équipements. A partir de ces éléments l'étape de préparation peut continuer. Pour les interventions de maintenance corrective, le diagnostic effectué lors de la demande d'intervention - combiné à l'historique des interventions et des pannes de l'équipement - complètent la documentation des constructeurs machines pour identifier les actions à réaliser. Une fois l'opération réalisée, la préparation doit capitaliser sur le retour d'expérience en cadrant les comptes rendus d'intervention des techniciens afin de collecter les données qui alimenteront les indicateurs de pilotage. Cette étape permet d'identifier les points à améliorer et les informations manquantes pour compléter et actualiser les plans de maintenance si besoin.

La préparation inscrit la maintenance dans une véritable démarche d'amélioration continue et, à travers elle, nous formalisons et construisons un premier « cycle naturel d'amélioration continu » que décrit (Mikler, 2015) dans le fonctionnement optimal de la maintenance (figure 27). Toute cette démarche permet à la fois d'obtenir des informations plus adaptées à la réalité du terrain et d'aboutir à une estimation de la durée des interventions la plus fine possible. Ce point est capital puisque l'estimation de la durée des interventions permet de quantifier la

charge de travail à réaliser. La suite de la méthodologie reprendra cette information lors de l'étape d'ordonnancement. La préparation tendra également à rapprocher le manager de ses équipes et facilitera ainsi la communication et le partage d'informations avec les autres services.

Dans le cadre de notre méthodologie, l'enjeu de l'étape de préparation est double. Premièrement, il s'agit de définir le niveau d'information(s) minimum à collecter pour réaliser l'intervention. Ces informations se retrouvent sur les Ordres de Travaux (OT) et guident les techniciens maintenance lors des opérations. Généralement, nous retrouvons dans les OT les informations suivantes (Palmer, 2013): caractéristiques de la zone d'intervention, consignes de sécurité, listes des actions à réaliser, compétences requises, outils et matériels nécessaires, temps estimé, et nombre de personnes requises. La liste des informations retenues influencera la reprise des plans de maintenance. Deuxièmement, il s'agit de définir le rôle du préparateur au sein des équipes de maintenance et celui des différents interlocuteurs. Les trois missions principales du préparateur sont :

- S'assurer de la « logistique » amont des interventions ;
- Estimer les temps d'intervention des opérations ;
- S'assurer du retour d'expérience de la part des techniciens.

Souvent, ces missions sont assurées – ou du moins en partie – par différentes personnes, notamment les responsables d'équipe maintenance ou les techniciens. Cependant, la plupart du temps elles sont négligées au détriment des opérations, car jugées non prioritaires. A ce niveau il est donc important de définir le rôle et le périmètre du préparateur vis-à-vis des responsables d'équipes maintenance, des techniciens, et des services production. Pour cela, nous pouvons utiliser des outils tels qu'une matrice des responsabilités, telle que la matrice RACI – Responsable, Approbateur, Consulté, Informé.

Synthèse de la deuxième phase de la méthodologie

La deuxième phase de la méthodologie permet d'une part d'identifier le juste niveau de maintenance à réaliser, grâce à deux outils : les analyses de criticité et la maintenance conditionnelle et d'autre part, de limiter les temps perdus lors des interventions grâce à la préparation. Les analyses de criticité sont une approche participative permettant de définir objectivement l'importance de chaque équipement vis-à-vis des objectifs de maintenance, tandis que la maintenance conditionnelle offre rapidement les gains économiques nécessaires pour entretenir une dynamique de changement. Enfin, l'étape de préparation formalise la première boucle d'amélioration continue au sein de la maintenance et entraîne alors une amélioration de la qualité des informations nécessaire pour la suite de la méthodologie, et permettant d'augmenter la productivité des employés.

4. Troisième phase de la méthodologie : Mise en œuvre et pilotage

La troisième et dernière phase du modèle fait converger les axes d'efficacité et d'efficience pour rendre la maintenance plus performante. Ainsi, l'étape d'ordonnancement utilise les différents outils d'optimisation de la phase précédente pour ajuster la quantité de travail permettant d'atteindre les objectifs de maintenance. Cette dernière brique vient compléter le processus maintenance (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) sur lequel nous nous basons pour adopter l'organisation. Enfin, cette dernière étape permet de mettre en place les éléments nécessaires au bon pilotage de la fonction maintenance.

4.1.L'ordonnancement des opérations de maintenance

L'étape d'ordonnancement est la première de la phase de mise en œuvre. A partir des outils d'optimisation de la deuxième phase, elle permet de s'assurer que chaque employé travaille sur ce qui est le plus utile pour l'entreprise tout en maximisant leur temps passé « au pied de la machine ». Ordonnancer les opérations de maintenance signifie réunir à un moment précis toutes les conditions permettant de les réaliser avec succès (Garg and Deshmukh, 2006). L'étape de préparation identifie et réunie toutes ces conditions. L'étape d'ordonnancement quant à elle, définit quand et par qui les opérations seront effectuées.

Pour clarifier comment nous intégrons les résultats des étapes de la phase d'optimisation, nous introduisons la notion de « Backlog ». Cette dernière représente la quantité de travail (des opérations correctives et des opérations préventives) identifiée à ce jour – à un instant t donné – comme devant être effectuée par le service maintenance (Rødseth and Schjølberg, 2017). L'étape de préparation des opérations de maintenance permet d'estimer (plus)précisément la durée de ces opérations. De ce fait, nous obtenons au global une bonne estimation en temps du « backlog » maintenance. Selon les bonnes pratiques de maintenance (Wireman, 1998), un bon niveau de « backlog » est d'environ deux à quatre semaines. Ce paramètre implique que la quantité de travail identifiée à un instant t donné, comme devant être effectuée par le service maintenance, est égale à environ deux à quatre fois la capacité de travail réalisable sur une semaine par le service maintenance. Cela signifie qu'il est indispensable de prioriser les opérations car les équipes de maintenance ne peuvent pas toutes les réaliser sur une semaine. C'est le premier rôle de l'étape d'ordonnancement.

Nous identifions quatre paramètres permettant d'ordonnancer les opérations de maintenance sur la semaine à venir :

- Le « backlog » maintenance ;
- La disponibilité des équipes de maintenance pour la semaine à venir ;

- La criticité des équipements ;
- Les contraintes d'exploitation.

La criticité des équipements sert de référence pour prioriser les interventions de maintenance. A cela s'ajoute les contraintes – ou conditions – d'exploitation qui peuvent modifier l'environnement de production et, l'importance relative des équipements. Ainsi, à partir de ces deux éléments, nous définissons - parmi les interventions contenues dans le « backlog » de maintenance - les prioritaires (à réaliser absolument sur la semaine) des autres (celles qui peuvent attendre). Pour connaître le nombre d'interventions de maintenance réalisables sur la semaine à venir, nous devons connaître impérativement la disponibilité des équipes de maintenance pour la semaine ainsi que la compétence des employés (électricien, mécaniciens, etc.). Pour y parvenir, nous utilisons le tableau représenté en figure 44.

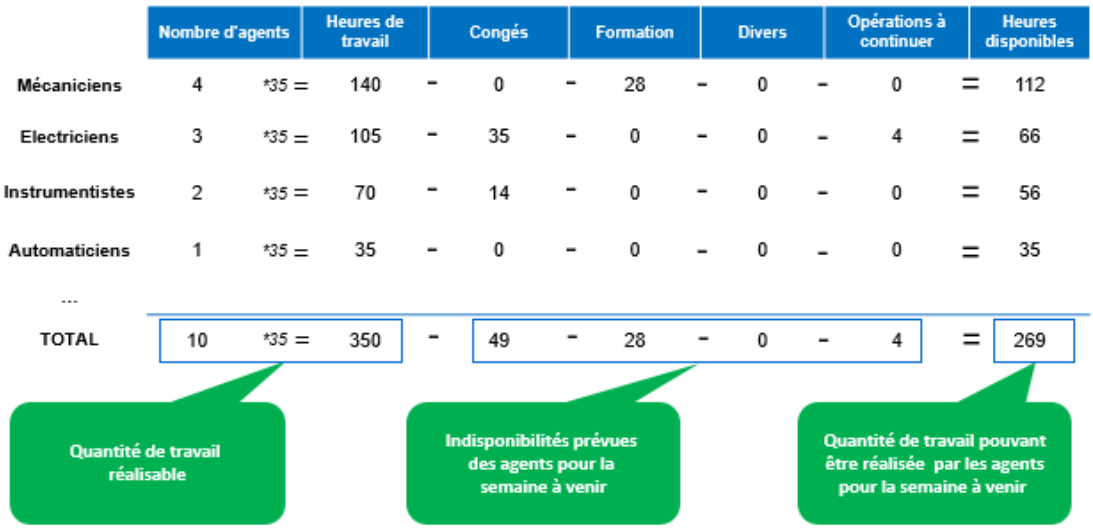


Figure 44: Outil de prévision de la disponibilité des équipes de maintenance selon leurs compétences

Il s'agit d'un tableau à double entrées, dans lequel nous retrouvons à la fois le nombre de techniciens réparti en fonction de leur compétence et, le nombre d'heures d'indisponibilité des techniciens. Notons que cet outil représente uniquement les indisponibilités connues à l'avance, par opposition aux indisponibilités « imprévisibles » telles que les absences des techniciens pour maladie.

A ce stade, nous disposons de trois informations « connues » :

- La quantité de travail réalisable par les équipes de maintenance pour la semaine à venir ;
- La priorité des interventions, c'est-à-dire celles à réaliser absolument la semaine prochaine, et celles qui peuvent attendre au-delà ;
- Le temps et les compétences nécessaires pour réaliser chaque opération.

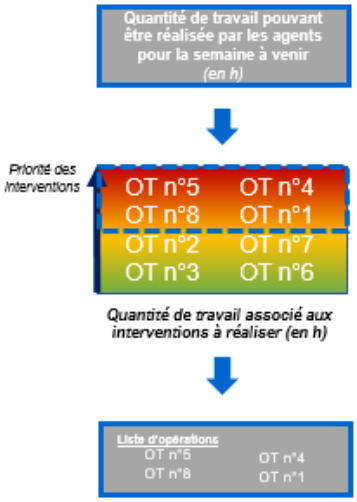


Figure 45: identifier les opérations de maintenance à réaliser - schéma de principe

Ces éléments nous permettent d'identifier une liste d'opérations de maintenance **réalisables sur la semaine** à venir, et **prioritaires** pour atteindre les objectifs de la maintenance (figure 45). Ainsi, chaque employé travaille sur les tâches les plus utiles pour l'entreprise. Il reste à présent à maximiser dans sa globalité, le temps passé par les employés « au pied de la machine ». L'étape de préparation contribue à accroître pour chaque intervention, la proportion de temps passé « au pied de la machine » par les employés. Cependant, cette donnée reste insuffisante pour augmenter de manière globale le « wrench time » des équipes. Ce constat s'explique notamment avec la loi de PARKINSON selon laquelle « plus vous disposez de temps pour réaliser une tâche, plus vous aurez tendance à utiliser complètement ce temps ». Pour contrer cet effet, il importe d'allouer la quantité de travail correspondant à la capacité des équipes de maintenance. Or, l'occurrence de panne d'équipements - phénomène aléatoire et difficilement prévisible - peut affecter considérablement les activités de maintenance. Pour surmonter ces difficultés, (Palmer, 2013) énonce deux règles à suivre :

- Programmer le nombre d'opération de maintenance correspondant à 100 % de la disponibilité des équipes de maintenance ;
- Expliquer aux équipes de maintenance qu'il est possible de ne pas respecter le planning sous certaines conditions.

A ce niveau de la méthodologie, nous avons identifié une liste d'opérations prioritaires en vue d'atteindre les objectifs de maintenance correspondant à la capacité de travail hebdomadaire des services maintenance de l'entreprise. Cela correspond à un « planning hebdomadaire ». Il reste à présent à déterminer quand ces opérations seront réalisées dans la semaine et qui les réalisera. Pour que la gestion des activités de maintenance puisse s'adapter facilement à la dimension aléatoire et imprévisible de l'environnement de production, un ajustement quotidien

des interventions à réaliser est nécessaire. Cela permet d'assurer la cohérence de ces interventions vis-à-vis de la réalité du terrain. A partir du planning hebdomadaire, les interventions sont affectées quotidiennement aux techniciens des équipes de maintenance en tenant compte de leurs compétences et de leurs expériences. Ici, un premier ajustement peut être utile en fonction de l'absence imprévue de techniciens. Par la suite, les ajustements quotidiens du planning hebdomadaire concerneront essentiellement trois points, explicités dans la figure ci-dessous (figure 46).

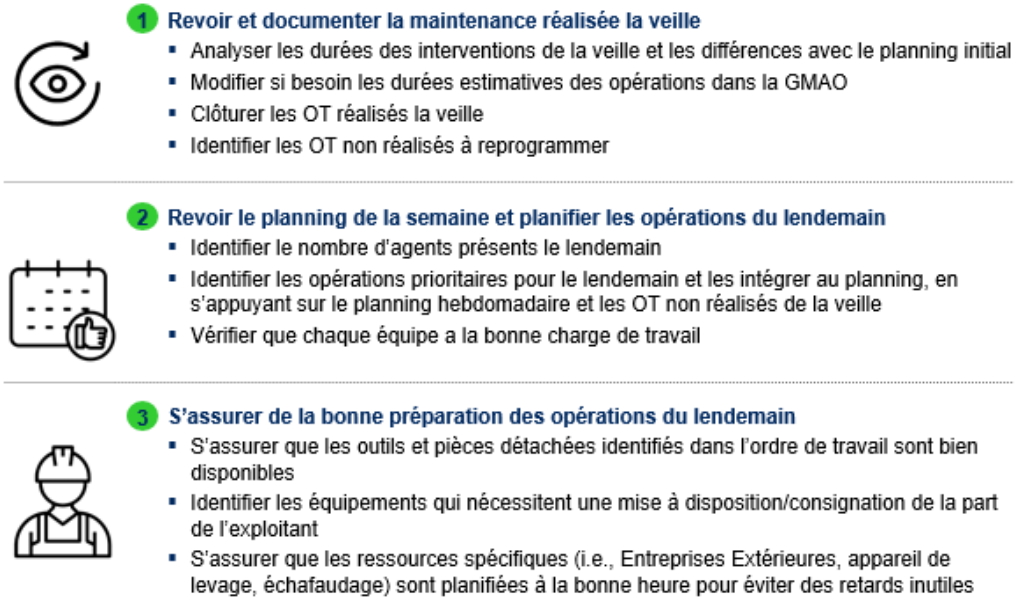


Figure 46: Descriptif des principaux ajustements quotidiens du planning hebdomadaire

Ces ajustements contribuent à la bonne exécution du planning hebdomadaire et, plus généralement à l'amélioration de la maintenance. Ils sont souvent réalisés par l'encadrement des équipes qui, au même titre que les préparateurs, portent la démarche d'amélioration continue en incarnant le « cycle d'amélioration de la planification des ressources » (Mikler, 2015). Ces différents aspects structurent et facilitent les échanges quotidiens entre la maintenance et la production. Le responsable d'équipes - doté d'une bonne connaissance de ses équipes et, au fait de l'avancée quotidienne des interventions - est légitime pour remplir ces missions. Ces compétences lui permettent d'anticiper tout changement potentiel successible d'impacter le planning hebdomadaire.

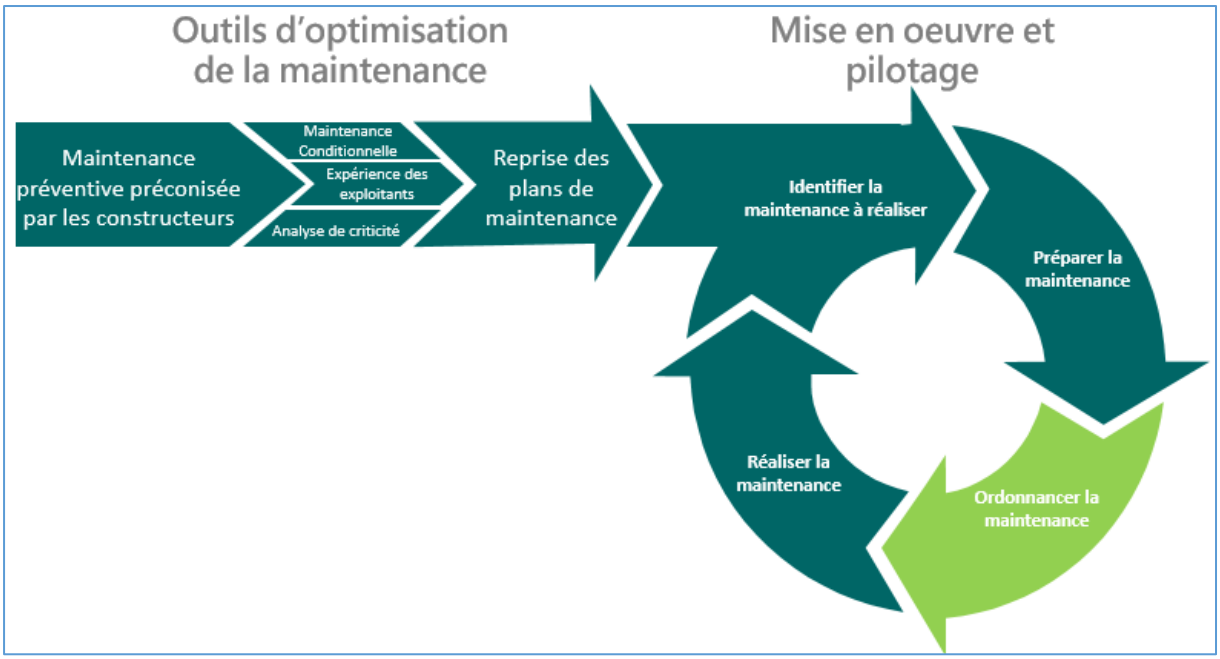


Figure 47: Intégration des outils d'optimisation de la maintenance dans le processus maintenance

Cette étape complète le processus simplifié de la maintenance tel que décrit par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995). A ce stade, les outils d'optimisation de la maintenance ont permis d'une part d'identifier le bon niveau de maintenance à réaliser pour atteindre les objectifs de l'entreprise (figure 47), et d'autre part d'organiser les activités de maintenance dans une démarche d'amélioration continue. L'entreprise possède ainsi un processus maintenance tenant compte de ses enjeux, et sur lequel organiser ses activités de maintenance. Il reste à présent à l'utiliser pour adapter l'organisation de maintenance de l'entreprise.

4.2.Adaptation de l'organisation de maintenance

A travers cette étape, nous adaptons l'organisation de la maintenance de l'entreprise pour qu'elle soit en mesure de réaliser le processus maintenance tel que défini. Nous l'avons constaté au cours de l'état de l'art, il n'existe pas une organisation idéale de la maintenance (Haroun and Duffuaa, 2009). En revanche, celle-ci doit évoluer continuellement pour répondre aux changements liés aux technologies, aux procédés et à son environnement (Schermerhorn, 2007). Ainsi, le processus maintenance formalisé par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) offre un cadre universel permettant de structurer l'organisation de maintenance dans une dynamique d'amélioration continue. Afin de réaliser les différents changements organisationnels, nous décomposons cette étape en trois points.

Premièrement, nous nous assurons que la capacité de maintenance est adaptée à la stratégie de maintenance mise en œuvre. Les différentes étapes développées dans la phase d'optimisation de la méthodologie ont permis d'une part d'identifier le juste niveau de maintenance à effectuer pour atteindre les objectifs de l'entreprise, et d'autre part de diminuer

le temps nécessaire pour le réaliser. De plus, la préparation des interventions, combinée à la reprise des plans de maintenance améliore la qualité du retour d'expérience des interventions, ce qui permet d'estimer la durée des interventions avec plus de précisions. A ce stade de la méthodologie, l'entreprise connait les actions à réaliser pour atteindre les objectifs de la maintenance, la quantité de travail que cela représente, et la capacité des équipes de maintenance. Par conséquent, elle dispose de toutes les informations requises pour ajuster en conséquence la capacité des équipes de maintenance (Haroun and Duffuaa, 2009).

De manière globale, les actions mises en œuvre au cours de la méthodologie permettent à la maintenance d'atteindre ses objectifs tout en réduisant les ressources nécessaires pour y arriver. Ainsi, théoriquement la capacité de la maintenance se retrouve supérieure à la charge de travail requise pour atteindre les objectifs de maintenance. Dans ces conditions, et en fonction des contraintes des entreprises, le top management peut décider d'internaliser des prestations réalisées par des entreprises externes, ou éventuellement de se séparer d'une partie de sa main d'œuvre en maintenance.

Deuxièmement, nous nous assurons que les services maintenance sont organisés pour assurer les missions contribuant à la bonne tenue du processus maintenance. Les étapes précédentes ont permis d'identifier et / ou de clarifier certaines missions clés dans le processus maintenance. Selon les entreprises, les fonctions de préparation et d'ordonnancement des opérations de maintenance – telles que présentées dans ce chapitre – sont souvent négligées voire inexistantes. Cette étape permet de redéfinir et préciser le rôle de chacun au sein du processus maintenance. Le tableau 12 regroupe les trois fonctions impliquées dans les étapes de préparation et d'ordonnancement des opérations de maintenance, et décrit les missions qui leurs sont associées. L'enjeu ici, est de s'assurer que ces fonctions sont bien portées par des personnes au sein de l'entreprise. En fonction de la taille des équipes et des spécificités des usines, plusieurs fonctions peuvent être portées par la même personne. Nous retrouvons dans la première colonne du tableau 12 les répartitions possibles de ces fonctions. A ce niveau, pour garantir la bonne exécution du processus maintenance, il est important que les fonctions « préparation » et « encadrement des équipes » soient sous la responsabilité de personnes distinctes (Palmer, 2013). Dans le cas contraire, le risque serait que la préparation soit à nouveau négligée au profit des difficultés et aléas rencontrés lors des interventions.

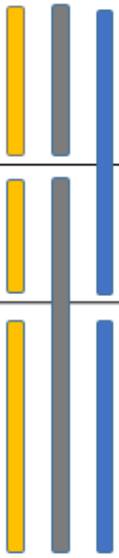
Organisations possibles	Fonctions	Missions
	Préparation	1. S'assure de la « logistique » amont des interventions ▪ Mise à disposition/consignation ▪ Outillage ▪ Pièces détachées ▪ Ressources : compétences, nombre et nature 2. Estime les temps d'intervention, notamment pour le correctif 3. S'assure des Retour d'Expérience
	Ordonnancement	1. Propose/décide de la période d'intervention et des équipes mobilisées pour chaque OT en hebdomadaire, et réajustement quotidien. 2. Garant de la bonne utilisation de la criticité (priorise en en tenant compte).
	Encadrement des équipes	1. S'assure de la faisabilité des opérations. 2. Encadre les équipes d'intervention dans un soucis de sécurité et d'efficacité 3. S'assure de la bonne application opérationnelle des processus de préparation et d'ordonnancement ▪ Vérifie la préparation ▪ Distribue le travail ▪ S'assure que les CR d'interventions soient renseignés (temps passé) 4. Contribue grâce à son expérience au bon fonctionnement et à l'amélioration du processus de planification.

Tableau 12: Définition des fonctions principales concernant la partie préparation-ordonnancement

Troisièmement, nous nous assurons que ces fonctions s'intègrent dans le quotidien des équipes de maintenance et de la vie des usines. Selon les cas, ces fonctions peuvent être complètement nouvelles pour les entreprises ou en partie réalisées. Ici, il est important de définir les interfaces entre les personnes qui assurent ces fonctions, ainsi que la manière dont elles interagissent. L'objectif à ce niveau est d'intégrer intelligemment ces fonctions dans la structure de fonctionnement quotidien de la maintenance – point du matin avec les équipes, point entre l'exploitation et la maintenance, point d'avancement.

Une fois l'organisation de la maintenance adaptée autour du processus de maintenance, il reste à s'assurer que la fonction maintenance est performante et atteint les objectifs fixés. Pour cela il est indispensable de mettre en place des indicateurs de pilotage pour la fonction maintenance.

4.3. Construction de tableaux de bord pour évaluer et piloter la performance de la maintenance

La dernière étape de la méthodologie consiste à définir et mettre en œuvre les indicateurs de performance de la maintenance nécessaires à son pilotage. Ces indicateurs permettent d'évaluer l'efficacité et l'efficience des actions mises en place, et contribuent de manière plus générale à comprendre la valeur ajoutée de la maintenance (Parida and Kumar, 2006). Ils doivent traduire le plus fidèlement possible le niveau de performance de la maintenance de l'entreprise pour qu'elle puisse prendre les décisions les plus adaptées à son environnement et

ainsi améliorer la performance de la maintenance. En effet, les mesures de performance, lorsqu'elles sont utilisées correctement concourent à détecter les problèmes et mettre en évidence les possibilités d'amélioration (Wireman, 1998). De ce fait, cette étape fait définitivement basculer la fonction maintenance de l'entreprise dans une dynamique globale d'amélioration continue. Au-delà de proposer un ensemble d'indicateurs traduisant le plus fidèlement possible l'état d'avancement de la méthodologie et le niveau de performance de la maintenance, l'enjeu est de placer la donnée au cœur du processus décisionnel de la maintenance, de façon à ce que le management de la maintenance puisse prendre le plus souvent possible les meilleures décisions (McKinsey & Company, 2018). Pour cela nous utilisons le cadre structurant de la mesure de la performance défini par (Muchiri et al., 2011) que nous adaptons légèrement en y ajoutant deux éléments (figure 48). Premièrement, les systèmes d'informations industrielles – tels que les systèmes de GMAO ou de supervision des équipements – qui contiennent les données nécessaires à la création des indicateurs ; et deuxièmement les différents outils d'optimisation de la maintenance mis en œuvre au cours de la méthodologie. Ainsi à partir de la figure 48, nous identifions quatre types d'indicateurs. Nous retrouvons des indicateurs liés à la qualité des données, des indicateurs d'avancement de projet, des indicateurs concernant le processus de maintenance ainsi que des indicateurs de résultats de la maintenance. Seuls les deux derniers sont à proprement parlé des indicateurs de performance. Les indicateurs de performance permettent aux différents responsables de prendre les décisions adaptées à leur situation, nous structurons ces indicateurs autour de quatre questions :

- Est-ce que nous disposons des informations nécessaires pour piloter et améliorer la maintenance ? (1)
- Quel est le niveau d'avancement des actions d'amélioration de la méthodologie ? (2)
- Est-ce que l'entreprise applique bien la stratégie de maintenance définie ? (3)
- Est-ce que la stratégie de maintenance permet de répondre aux objectifs fixés ? (4)

Ces questions orientent le choix des indicateurs, et forcent le management à identifier les raisons qui le poussent à les implémenter. De cette manière il sera plus facile d'impliquer les employés dans la collecte des données nécessaires pour construire les indicateurs (Galar et al., 2011). Ainsi, chaque indicateur retenu doit aider les responsables maintenance à répondre à ces questions.

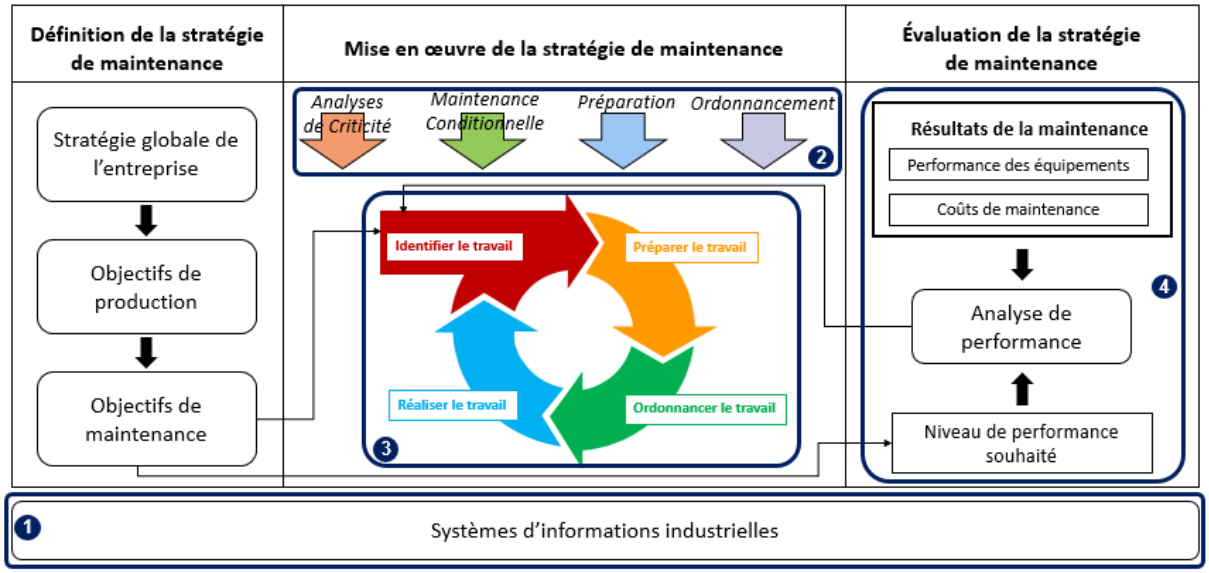


Figure 48: Cadre structurant la mesure de la performance pour la fonction maintenance – adapté des travaux de (Muchiri et al., 2011)

Premièrement, nous avons les indicateurs concernant la qualité de données. Ils permettent de s'assurer que les systèmes d'information – en particulier ceux liés à la maintenance – disposent de toutes les données nécessaires et utiles à la construction des indicateurs de performance. Ils traduisent l'état de collecte de données des systèmes d'information en fonction de certaines données clés. La plupart de ces données sont identifiées lors de la phase d'analyse de notre modèle. Les autres sont définies en fonction des indicateurs de performance de maintenance retenus. Ce premier type d'indicateur assure la pertinence et la légitimité des indicateurs de performance de la maintenance.

Actions d'amélioration	Indicateurs d'avancement
Analyses de criticité	• Nombre d'équipements côtés avec les analyses de criticité
Reprise des plans de maintenance	• Nombre de caractéristiques renseignées dans les plans de maintenance • Nombre de plans de maintenance avec une fréquence d'intervention modifiée
Maintenance conditionnelle	• Nombre d'équipements suivis avec des techniques de maintenance conditionnelle
Préparation des interventions de maintenance	• Nombre d'équipements suivis avec des techniques de maintenance conditionnelle

Figure 49: Exemples d'indicateurs d'avancement pour le déploiement de la méthodologie

Deuxièmement, nous retrouvons les indicateurs d'avancement de projet. Ils permettent de caractériser le niveau d'avancement des étapes de la méthodologie, et sont nécessaires pour piloter le déploiement de la méthodologie au sein de l'entreprise. La figure 49 propose des indicateurs pour chaque étape de la phase d'optimisation de la maintenance de la méthodologie. Troisièmement, nous avons les « indicateurs du processus maintenance » qui sont définis pour chaque étape – Identifier ; Préparer ; Ordonnancer ; Réaliser – et permettent de gérer au quotidien les activités de maintenance. Ils garantissent la bonne tenue des opérations et le fait que la stratégie de maintenance soit bien mise en œuvre. Ceux sont les indicateurs dits « *leading* » selon (Dwight, 1999). A partir de l'état de l'art, chaque entreprise peut sélectionner les indicateurs qui lui semblent les plus pertinents tout en veillant à ce qu'ils couvrent l'intégralité du processus maintenance. Pour cela ils peuvent s'appuyer sur la figure 50 qui illustre le découpage des indicateurs de performance de la maintenance.

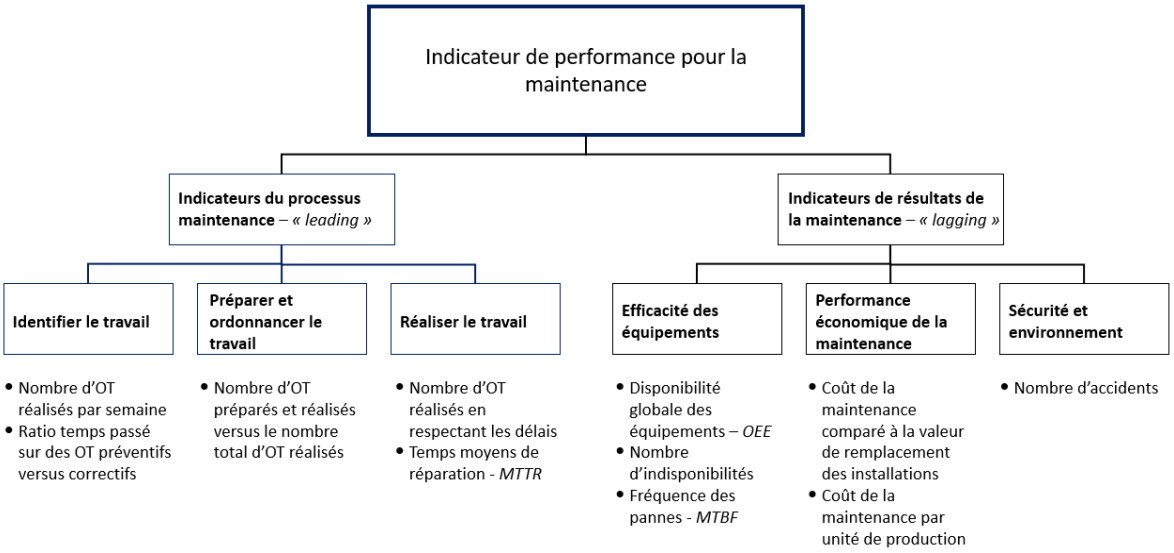


Figure 50: Découpage des indicateurs de performance de la maintenance selon (Kumar et al., 2013)

Quatrièmement, nous retrouvons les « indicateurs de résultats de la maintenance ». Une fois le processus maintenance implémenté et exécuté, les résultats de la maintenance obtenus sur une période donnée doivent être contrôlés. Pour cela, ces résultats sont comparés aux objectifs de l'entreprise pour valider ou non la pertinence de la stratégie de maintenance retenue. Une parfaite analyse permet également d'identifier les écarts de performance de certains équipements ou ateliers de production, et ainsi alimenter les réflexions concernant les actions d'amélioration à entreprendre. A ce niveau nous retrouvons notamment les indicateurs identifiés lors de la première phase de la méthodologie concernant la performance économique de la maintenance. Selon les objectifs de la maintenance, ces indicateurs peuvent être complétés

par des indicateurs liés à la sécurité des biens et des personnes ainsi que d'autres en lien avec la disponibilité des installations. Il s'agit ici des indicateurs dits « *leading* » selon (Dwight, 1999). La figure 50 illustre ce découpage et permet également de structurer le choix des « indicateurs de résultats de la maintenance ». Ces derniers indicateurs placent définitivement l'organisation de la maintenance dans une dynamique d'amélioration continue.

Synthèse de la troisième phase de la méthodologie

Cette dernière phase de la méthodologie consiste à intégrer les outils d'optimisation issus de la phase précédente, dans le fonctionnement quotidien de la maintenance. Cela se traduit par leur mise en œuvre au sein du processus simplifié de la maintenance – Identifier ; Préparer ; Ordonnancer ; Réaliser.
Cette troisième phase débute par la formalisation de l'étape d'ordonnancement qui s'appuie sur les résultats issus à la fois des analyses de criticité, de la reprise des plans de maintenance, ainsi que de l'étape de préparation. Elle se poursuit par l'ajustement de l'organisation de la maintenance à partir du processus de maintenance simplifié. Une fois l'organisation adaptée selon les contraintes et objectifs de l'entreprise, les indicateurs de performance de la maintenance sont définis et implémentés. Ils permettent d'évaluer le niveau de performance de la maintenance et ainsi de déclencher les actions d'améliorations adaptées.
Au terme de cette phase, l'entreprise dispose d'une organisation de la maintenance lui permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance afin de prendre les décisions les plus adaptées à ses enjeux.

Chapitre 3

Expérimentation

Chapitre 3 : Expérimentation

Lors du chapitre précédent, nous avons identifié notre problématique de recherche – *Comment faire évoluer les entreprises d'envergure pour améliorer leur fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques ?* – ainsi que notre hypothèse de résolution – *Formalisation d'un modèle managérial global de la fonction maintenance*. Pour tenir compte de notre hypothèse, nous avons proposé et présenté une méthodologie globale d'évolution de la fonction maintenance (figure 51). A présent, nous allons expérimenter cette méthodologie au sein de l'établissement public industriel accueillant ces travaux de recherche – le SIAAP – afin de vérifier notre hypothèse et de valider la pertinence de notre méthodologie.

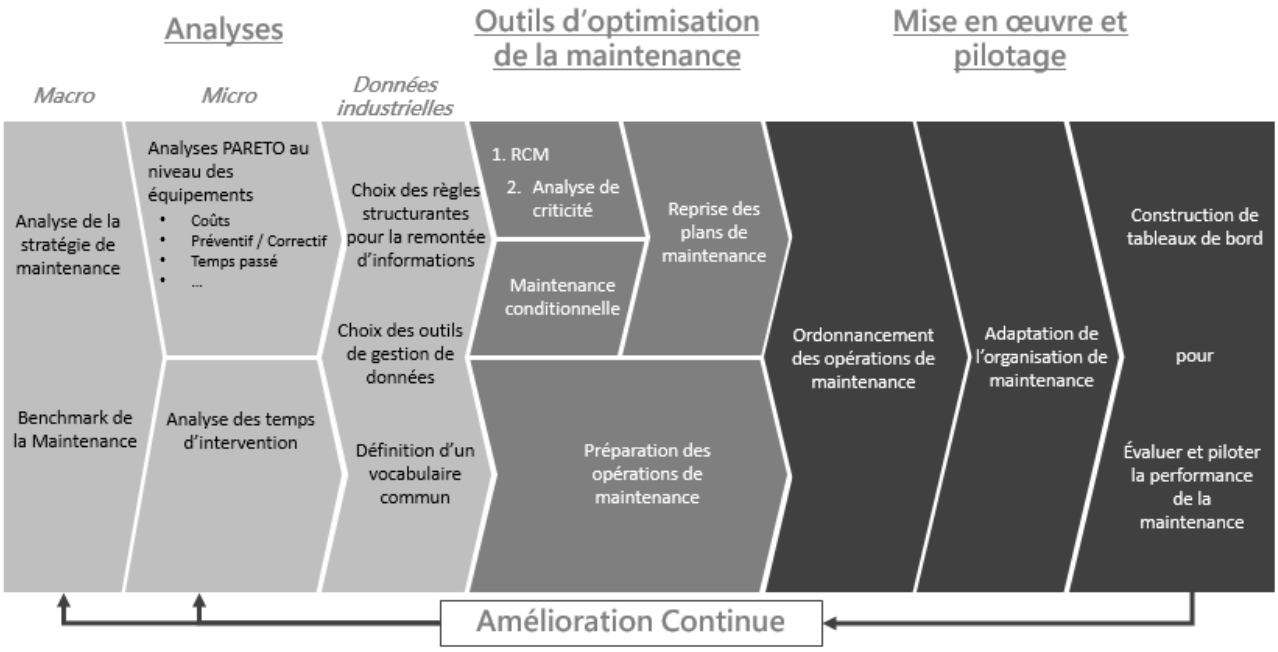


Figure 51: Rappel de la méthodologie présentée au chapitre 2

Notre projet de recherche s'intègre dans une dynamique de changement impulsée en 2016, et portée à l'échelle du SIAAP par le projet d'entreprise ***SIAAP 2030***. Ce chapitre commence par introduire le projet *SIAAP 2030* et positionner les travaux de thèse dans cette démarche globale. Cela permet également de décrire la structure de gouvernance du projet, nécessaire pour piloter une telle transformation à grande échelle, et sur laquelle nous nous appuierons pour expérimenter notre méthodologie. La suite du chapitre détaille la mise en œuvre des différentes phases de la méthodologie au sein du SIAAP. Ainsi, nous commençons par conduire la phase d'analyses qui nous permet d'une part, de comprendre le fonctionnement et les enjeux de la maintenance au SIAAP, et d'autre part d'identifier les spécificités importantes de ce grand service public. A partir de ces analyses, les outils d'optimisation de la

maintenance – proposés par la méthodologie – sont adaptés aux besoins du SIAAP via différents groupes de travail collaboratifs en interaction avec les directions opérationnelles[14]. Cela permet à la fois d'impliquer les acteurs de la maintenance, et d'harmoniser les pratiques sur l'ensemble des directions. A l'issue de cette deuxième phase, nous intégrons – à partir du processus de maintenance simplifié – ces bonnes pratiques dans le fonctionnement quotidien de la maintenance. Cela entraîne des ajustements organisationnels, et s'accompagne de la mise en œuvre d'indicateurs de performance maintenance pour évaluer la valeur ajoutée de la fonction maintenance et ainsi vérifier son bon fonctionnement. La dernière partie de ce chapitre présente une application de la phase quatre de la méthodologie sur un périmètre réduit. Cela permet ainsi de vérifier l'apport des innovations technologiques sur la performance économique de la maintenance.

I. Le projet « *SIAAP 2030* »

Depuis 2016, le SIAAP a entrepris de définir un projet d'entreprise à l'horizon 2030 – ***SIAAP 2030*** – pour anticiper et répondre à l'urbanisation francilienne, la diminution des volumes d'eaux et, aux évolutions règlementaires et sociétales. Cette partie présente la démarche globale de ce projet, ainsi que les éléments favorisant le déploiement de la méthodologie développée dans ces travaux de thèse.

1. Présentation globale de la démarche « SIAAP 2030 »

Le projet stratégique *SIAAP 2030* a pour ambition de préparer le SIAAP à affronter les nouvelles contraintes issues de l'évolution de son environnement et des enjeux qui en découlent. Le SIAAP a sollicité un cabinet de conseil – TILIA[15] – pour l'accompagner dans l'élaboration et la mise en œuvre du projet.

A partir des nombreux défis identifiés comme une « nouvelle donne », le SIAAP a pu définir une vision à l'horizon 2030 : « Déployer pleinement le potentiel de l'assainissement au bénéfice des femmes et des hommes, de la ville et de l'environnement ». Cette ambition a ensuite été découpée en quatre axes de réflexion permettant de définir la stratégie du SIAAP à mettre en œuvre. A l'issue de cette première phase du projet, 120 fiches idées détaillées ont été

[14] Les directions opérationnelles du SIAAP regroupent les usines de production et la direction en charge du système d'assainissement et du réseau

[15] **Tilia** est un cabinet de conseil stratégique franco-allemand fondé en 2009 et, spécialisé dans les domaines de l'énergie, de l'eau et des services environnementaux.

formalisées, contribuant à définir un plan d'action de 98 actions structurées en 11 programmes autour de trois axes stratégiques (figure 52).

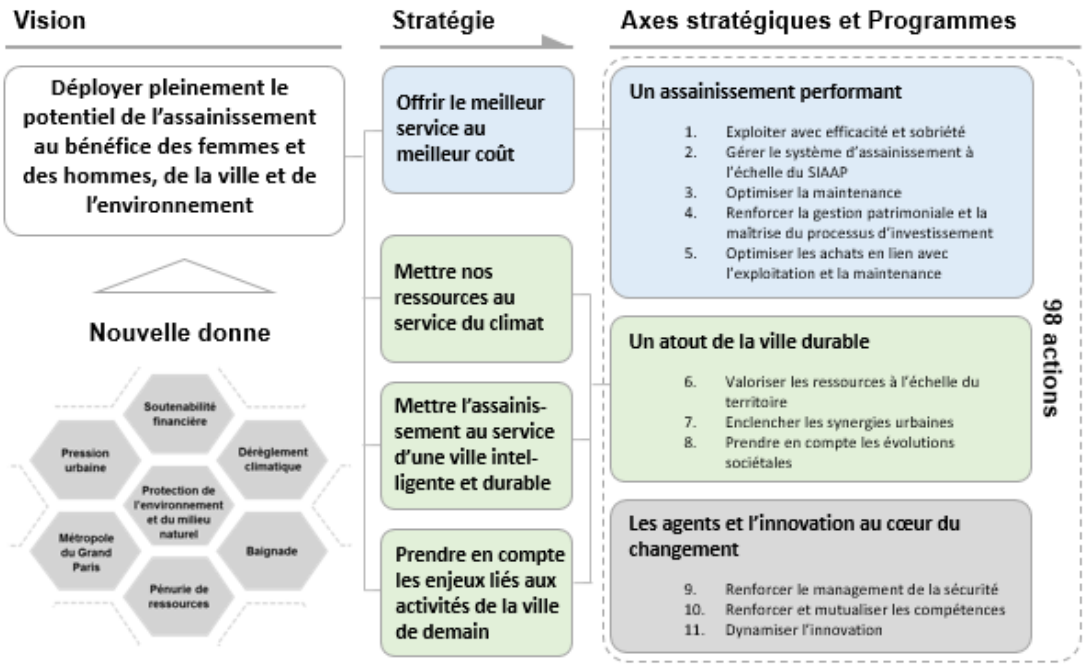


Figure 52: Représentation de la phase 1 du projet d'entreprise SIAAP 2030

Nous retrouvons dans la figure 52 les programmes 3 et 4 qui s'intègrent dans l'axe stratégique « un assainissement performant » et contribuent à « Offrir le meilleur service au meilleur coût ». La formalisation de ce plan d'action clôt la phase 1 d'élaboration du projet d'entreprise. A présent, l'enjeu concerne la mise en œuvre de ce plan – phase 2 – avant de pérenniser les bonnes pratiques dans un troisième temps. La figure 53 représente le séquencement de ces trois phases et la durée du projet de thèse.

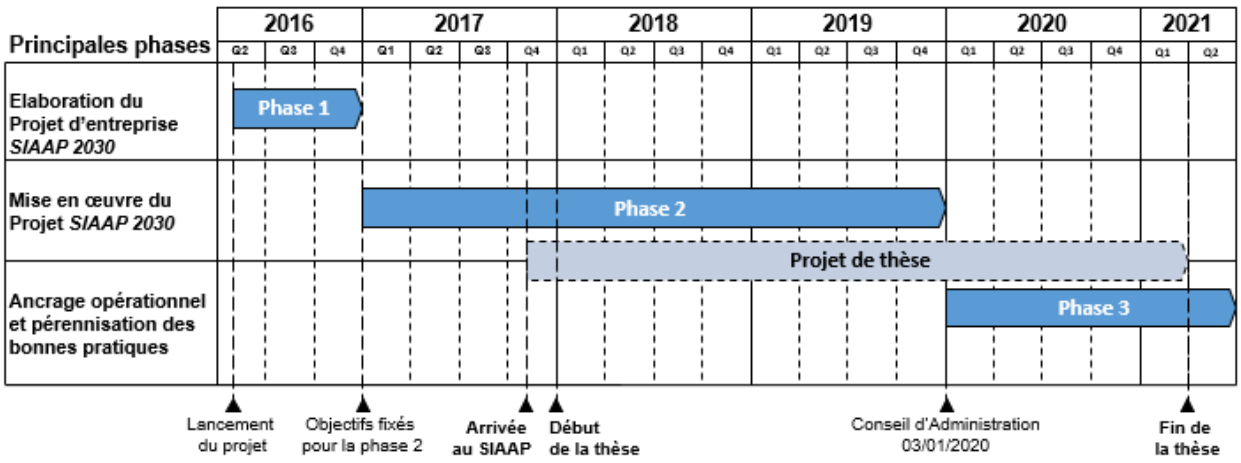


Figure 53: Séquencement du projet stratégique SIAAP 2030 et du projet de thèse

Ainsi, la thèse s'intègre dans les phases de mise en œuvre et d'ancrage opérationnel du projet *SIAAP 2030.* Elle bénéficie des analyses et des réflexions menées lors de la phase 1, ainsi que de l'organisation du pilotage de ce projet stratégique. Ces deux éléments sont détaillés dans la section suivante.

2. Articulation du projet de thèse vis-à-vis du projet SIAAP 2030

Pour mettre en œuvre le projet *SIAAP 2030*, et conduire les changements qui en découlent à l'échelle du syndicat, le SIAAP a mis en place un mode projet représenté en figure 53. Cette « structure par projets » correspond, au sens de (Ackerman Anderson and Anderson, 2010), au ***processus*** (figure 33), véritable infrastructure supportant le changement et constituant un des trois aspects des stratégies globales de changement. Nous retrouvons les éléments identifiés par (McKinsey & Company, 2016) tels que la gouvernance du projet, le responsable de la transformation, la fréquence des réunions des différentes instances ou les outils de « *reporting* ». Ainsi, le Comité de Pilotage du projet – CoPil – s'assure de l'avancement global du projet, définit les priorités et les livrables et, résout les problèmes et les questions remontées par les programmes. Il est composé du directeur général, de ses adjoints et de certains membres du Comité De Direction – CDD – référents de programme. Nous retrouvons également à ce niveau le chef de projet global – le « responsable de la transformation ». Le CoPil se réunit toutes les deux semaines, en alternance avec le CDD. Les onze programmes du plan d'action sont pilotés par un responsable de programme épaulé d'un suppléant. Ce binôme, véritable acteur du changement au cœur du projet, pilote des équipes et affecte les actions. Il assure également le suivi de l'avancement des actions, coordonne leur programme avec les dix autres et, contribue tant à la réflexion qu'à la mise en œuvre du projet d'entreprise. Pour mener ces missions, le responsable de programme et son suppléant organisent des réunions mensuelles avec les différents pilotes d'action qui composent leur programme. Enfin, les pilotes d'actions s'occupent de développer le contenu des actions dans une démarche de coordination entre les directions concernées. Ils identifient les ressources nécessaires pour conduire leur action et pilotent l'équipe projet. Selon les besoins et l'avancée de leur action ils réunissent leur équipe. Le détail des missions de chaque instance et leurs participants figure en annexe 3.

Pour déployer notre méthodologie sur l'ensemble du SIAAP, nous utilisons ainsi la structure par projets, présentée en annexe 4, en nous appuyant particulièrement sur les programmes 3 – « Optimiser la maintenance » - et 4 – « Renforcer la gestion patrimoniale et la maîtrise du processus d'investissement » - contenant respectivement chacun douze et six actions. A l'aide de la dynamique de changement insufflée par le projet *SIAAP 2030* et, en se basant sur les

référents et les pilotes d'actions des programmes 3 et 4, nous allons expérimenter notre méthodologie à l'échelle du SIAAP.

II. Première phase : analyses de la fonction maintenance

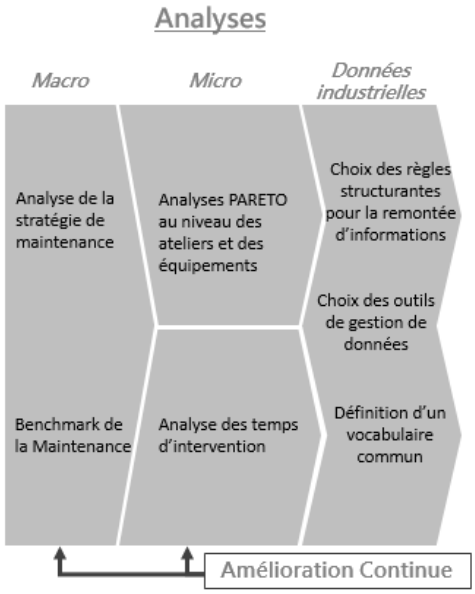
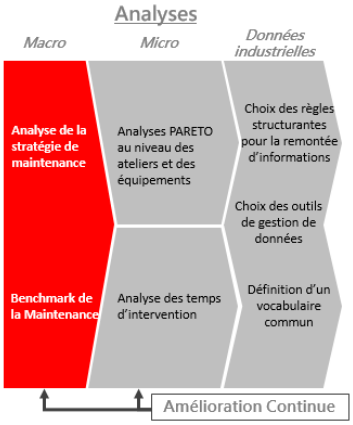


Figure 54: Rappel de la première phase de la méthodologie présentée au chapitre 2

Cette première phase de la méthodologie (figure 54) se déroule en trois étapes : une analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale, une analyse locale du fonctionnement de la maintenance et, une dernière étape d'analyses concernant la qualité des données industrielles. L'annexe 5 détaille la chronologie de mise en œuvre des différentes étapes de la méthodologie par rapport aux actions du projet *SIAAP 2030*.

1. Analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale



L'analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale repose sur un ensemble de caractéristiques identifiées dans l'état de l'art permettant de qualifier l'ensemble des activités de maintenance. A ce titre, l'audit de maintenance contribue à identifier la valeur – ou un ordre de grandeur – de ces caractéristiques pour l'entreprise. Pour cette étape, nous nous appuyons sur les résultats obtenus à travers le questionnaire réalisé auprès des différentes directions opérationnelles lors de la phase 1 du projet. Il se décompose en trois parties intitulées :

- ***Politique de maintenance*** **–** cette partie concerne le périmètre et le budget de la maintenance ; le management de la maintenance ; la politique de maintenance mise en œuvre ; et la mutualisation de certaines compétences.
- ***Efficacité de la maintenance*** **–** cette partie aborde plus en détails le management et la politique de maintenance mise en œuvre. Elle cible notamment les éléments comme la criticité, la préparation des interventions, la maintenance

conditionnelle et, l'utilisation d'indicateurs de performance. La sécurité des interventions, le recrutement de compétences et la gestion documentaire sont également abordés dans cette partie.

- ***Gestion patrimoniale* –** cette partie traite de la politique de gestion patrimoniale mise en place par le SIAAP et, identifie les outils et l'organisation mis en œuvre pour l'appliquer.

Parmi les personnes interrogées, celles-ci occupent essentiellement les fonctions suivantes :

- Directeur d'usine ;
- Responsable de production ou d'unité de production ;
- Responsable maintenance ;
- Responsable des méthodes maintenance ;
- Responsable d'équipe d'intervention maintenance.

Ce questionnaire couvre la plupart des thématiques identifiées par notre méthodologie (tableau 8). Il permet à la fois d'identifier les ordres de grandeurs recherchés – regroupés dans le tableau 13 – et de comprendre le fonctionnement global des activités de maintenance.

Données obtenues pour l'année 2014		Unités	**Usines SIAAP**	**Usine SAV**	**Usine SEG**
Capacité de production	*Charge*	Equivalent Habitant	**9 400 000**	**4 564 000**	**1 000 000**
	Capacité utile (Volume journalier)	m^3/j	**2 548 000**	**1 460 000**	**300 000**
	Débit annuel	m^3/an	**897 473 984**	**578 890 000**	**103 282 519**
Effectifs	*Taille des effectifs*	Equivalent Temps Plein	**1 240**	**772**	**85**
	Taille des effectifs maintenance	ETP	**353**	**293**	**32**
Budget d'exploitation	*Budget d'exploitation*	k€	**212 699**	**110 531**	**13 713**
	Budget maintenance	k€	**73 210**	**41 823**	**5 213**

Tableau 13: Ordres de grandeurs obtenus pour le SIAAP

A partir du tableau 13, nous notons que les effectifs maintenance concernent environ 30 % des effectifs présents sur les usines et, que les coûts de maintenance correspondent à un peu plus d'un tiers du budget de fonctionnement des usines. Enfin, le SIAAP étant son « propre assureur », il dispose uniquement d'une estimation globale du patrimoine – 8 milliards d'euros – et non, de la valeur de remplacement des installations. Ces informations ont également été

utilisées pour réaliser un benchmark des coûts unitaires de maintenance (figure 55) avec d'autres services d'utilités proposés par l'entreprise TILIA. La figure 55 reprend les données de la figure 4 et met en évidence la moyenne des coûts unitaires de maintenance des autres services d'utilités. L'histogramme souligne à la fois l'écart important des usines du SIAAP vis-à-vis de ces services et le potentiel d'optimisation que représente la maintenance pour le SIAAP. L'autre point à relever est que les coûts unitaires de maintenance pour une des usines du SIAAP – l'usine Seine Grésillons (SEG) – se situent dans la moyenne des autres services d'utilités. Dans une démarche d'optimisation et d'accompagnement au changement ce facteur est essentiel. Il contribue à rassurer les équipes sur le fait qu'il est possible de s'améliorer et de se rapprocher du niveau de référence dans le secteur industriel considéré.

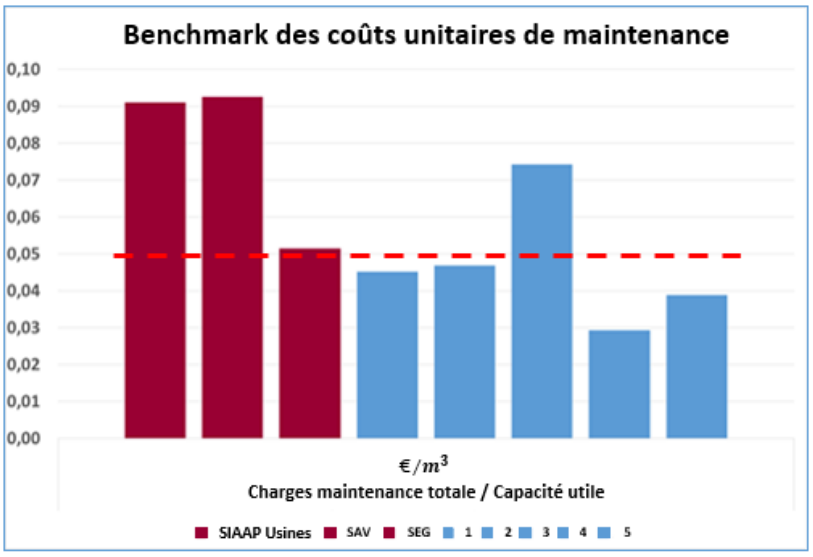


Figure 55: Benchmark des coûts unitaires de maintenance - moyenne

L'analyse des résultats du questionnaire permet également de comprendre le fonctionnement global des activités de maintenance et, d'identifier le niveau de maturité de la fonction maintenance vis-à-vis de certains éléments de la méthodologie. Nous présentons ici une synthèse globale autour de sept points clés :

- ***Politique de maintenance*** **–** La politique de maintenance du SIAAP est floue et nullement formalisée. La volonté est de privilégier le préventif au correctif. La maintenance préventive dite systématique est essentiellement - voire exclusivement - réalisée.
- ***Analyse de Criticité*** **–** Selon les sites, il existe quelques études récentes (inférieures à 2 ans). Sur chaque site des Analyses de Mode de Défaillance Et de leur Criticité – AMDEC - sont réalisées pour définir la criticité des équipements. Or, elles sont réalisées en phase de conception des installations et rarement actualisées (aucune périodicité de

mise à jour n'est fixée). Une fois obtenue, la criticité est très peu prise en compte dans la gestion quotidienne des activités de maintenance. Certains s'en servent pour prioriser les opérations sur les points faibles des installations, d'autres l'utilisent pour la gestion des stocks des pièces de rechange et, quelques-uns priorisent leurs interventions avec.

- ***Maintenance conditionnelle*** **–** Elle est globalement peu mise en œuvre. Parmi les différentes techniques, nous retrouvons essentiellement les analyses vibratoires mais aussi des analyses d'huiles et thermiques. A chaque fois, il s'agit d'initiatives propres aux sites ou aux responsables maintenance.
- ***Préparation et Ordonnancement*** **–** Nous notons que le terme « planification » est également utilisé, soit en remplacement d'un des deux termes précédents, soit pour désigner les deux. La partie préparation est assurée par les employés de terrains. L'ordonnancement est souvent géré par les méthodes de maintenance ; certains sites ont un technicien – « un planificateur » - dédié à cette tâche. Selon les sites, le périmètre des interventions concernées par une préparation et un ordonnancement varie, de même que les processus et les réunions permettant d'assurer ces fonctions. Les deux outils utilisés pour préparer et ordonnancer les opérations sont la GMAO et des fichiers Excel.
- ***GMAO*** **–** Elle sert essentiellement pour renseigner les Comptes Rendus d'Interventions et permettre un suivi des actions ; mais n'est ni perçue ni utilisée comme un outil d'aide à la décision. Les règles d'utilisation et leur niveau de formalisation varient selon les sites. Globalement la GMAO est peu renseignée.
- ***Indicateurs de maintenance*** **–** Ils sont réalisés à partir des données de la GMAO. Parmi ceux qui reviennent le plus souvent nous retrouvons le suivi du nombre d'Ordres de Travail (OT) préventifs et correctifs, ainsi que celui des OT réglementaires. Certains sites développent des indicateurs de disponibilité. Les avis sont partagés quant à la pertinence de mettre en place des indicateurs à l'échelle du SIAAP.
- ***Asset Management*** – A défaut d'avoir une politique de gestion patrimoniale, les directions opérationnelles se concentrent sur les opérations de maintenance et de renouvellement d'infrastructure, sans logique d'investissement pour l'évolution de son patrimoine industriel. L'absence de responsable de patrimoine local est compensée par un plan pluriannuel d'investissement. Cependant, ce plan n'offre pas de visibilité supérieure à cinq ans concernant les investissements à venir. Enfin, nous notons que l'inventaire physique des équipements liés au processus de production est réalisé à partir de la GMAO. Cet inventaire est partiel, puisqu'il résulte des données renseignées par

les techniciens sans règles précises et garanties d'exhaustivité quant au périmètre à couvrir.

Cette analyse montre d'une part, que le SIAAP dispose des outils permettant d'améliorer la gestion des activités de maintenance et d'autre part, que le faible niveau de formalisation et de mutualisation des bonnes pratiques de maintenance l'empêche d'atteindre un niveau de performance supérieur. Les résultats issus du questionnaire de la phase 1 projet *SIAAP 2030* permettent d'obtenir une bonne compréhension du fonctionnement de la maintenance et de son niveau de performance. Cependant, nous réalisons une nouvelle série d'entretiens - uniquement avec les responsables maintenance des directions opérationnelles - pour caractériser le niveau de performance de la maintenance via le questionnaire proposé par (Wireman, 2015). Au cours du deuxième semestre 2018, nous avons rencontré la plupart des responsables maintenance – parfois accompagnés de leur adjoint – pour un échange d'environ trois heures. La figure 56 représente la moyenne des scores obtenus pour les quatre directions opérationnelles concernées. Bien que la part des volumes d'eau traités diffère d'une direction à l'autre, nous n'avons pas appliqué de pondération pour obtenir cette moyenne. Les résultats obtenus ont été présentés au responsable du service gestion-patrimoniale du SIAAP et lui semblent cohérents avec la réalité rencontrée sur les usines.

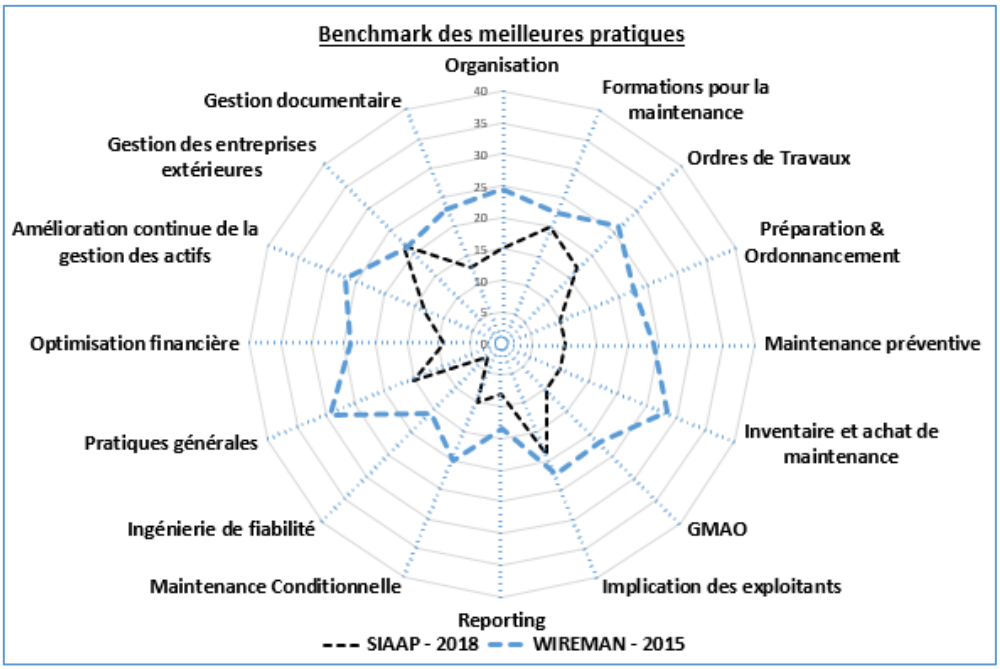


Figure 56: Représentation du benchmark des bonnes pratiques de maintenance à travers le SIAAP sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015)

La figure 56 représente également – en bleu – la moyenne obtenue par Terry Wireman en réalisant l'audit d'un panel d'entreprises – un peu plus de 1200 – issues du domaine

manufacturier entre les années 2000 et 2015. Nous pouvons ainsi constater l'écart important du SIAAP vis-à-vis de ce secteur en termes de maîtrise des pratiques de maintenance. A ce niveau, une comparaison avec d'autres services d'utilités s'avèrerait plus pertinente pour tenir compte des particularités du domaine de l'assainissement. Néanmoins, la figure 56 permet aussi de souligner le faible niveau de maîtrise du SIAAP concernant plusieurs aspects de la maintenance (note obtenue ≤ 10), à savoir :

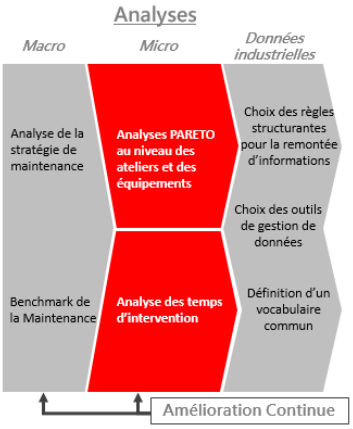
- La préparation et l'ordonnancement ;
- La maintenance préventive ;
- L'inventaire ;
- La GMAO ;
- Le reporting ;
- La fiabilité ;
- L'optimisation financière.

Ces sept lacunes représentent autant de leviers sur lesquels s'appuyer pour améliorer le niveau de performance globale de la maintenance au SIAAP.

Cette première étape offre un aperçu global des enjeux et points d'amélioration de la maintenance au SIAAP. Nous pouvons noter la part importante des coûts de maintenance dans le budget d'exploitation (un peu plus de 30 %), ainsi que des coûts unitaires de maintenance presque deux fois supérieur à ceux d'autres services d'utilités de taille comparable. Enfin, plusieurs pistes d'amélioration telles que la préparation et l'ordonnancement des opérations de maintenance ou encore l'utilisation de la GMAO ont pu être identifiées.

2. Analyse Microscopique de la maintenance

L'analyse microscopique de la maintenance repose sur une étude locale de deux critères, à savoir le « *wrench time* » et la répartition des ressources de maintenance en fonction des équipements de production. Pour mener à bien ces analyses, nous nous sommes rapprochés au niveau local des équipes et des services méthodes de maintenance – garants de la bonne utilisation de la GMAO sur les sites – et en central, des administrateurs de la GMAO.



A partir des données issues de la GMAO, nous réalisons pour chaque direction opérationnelle une analyse des temps passés et des dépenses en maintenance, telle que présentée dans le deuxième chapitre. Ici, nous présentons les résultats obtenus sur une partie de l'usine

Seine Aval. Le tableau 14 détaille les principales caractéristiques de l'étude et, la figure 57 représente les équipements concentrant les dépenses les plus importantes en maintenance.

Périmètre considéré	*Ateliers du Prétraitement, de la clarifoculation, de la biologie et de La Frette*
Nombre d'équipement	*32 358*
Période considérée	*1er janvier 2016 – 31 décembre 2018*
Total des dépenses en maintenance renseignées sur la période considérée	*12 692 862 € (opérations sous-traitées)*

Tableau 14: Caractéristiques de l'étude menée sur l'usine Seine Aval

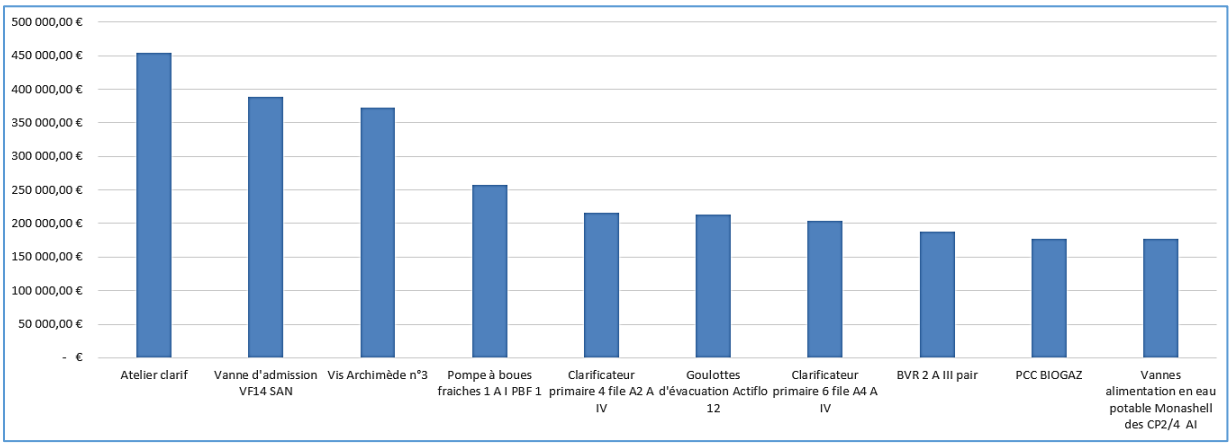


Figure 57: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance des équipements des ateliers du Prétraitement, de la clarifoculation, de la biologie et de La Frette de l'usine Seine Aval

Les analyses de criticité réalisées étant inutilisées par les sites dans la gestion quotidienne des activités de maintenance, nous avons jugé qu'il était inopportun de croiser les résultats de cette étude avec la criticité des équipements. En revanche, ces résultats ne seront exploités - en ce sens – qu'une fois la nouvelle criticité établie.

A ce niveau d'avancement de la méthodologie, l'analyse des temps passés et des dépenses en maintenance permet une meilleure compréhension de la gestion de la fonction maintenance et de l'utilisation de la GMAO. L'étude des coûts de maintenance montre que 80 % des coûts de maintenance sont concentrés uniquement sur 138 équipements du périmètre considéré ; ce qui confirme l'hypothèse selon laquelle il est pertinent de se focaliser sur un nombre réduit d'équipements à fort impact sur les objectifs de maintenance. Le deuxième aspect soulevé par ces analyses confirme la manière dont est considérée et utilisée la GMAO, à savoir exclusivement comme un outil de reporting et non comme un outil d'aide à la décision. Ce mauvais usage impacte la qualité des données renseignées en GMAO (Galar et al., 2011) et donc, les analyses issues ces données. La figure 57 souligne un de ces problèmes : nous constatons que l'équipement concentrant le plus de dépenses en maintenance – « *Atelier clarif* »

- est en réalité un atelier complet. A ce niveau nous perdons de l'information puisque les quelques *450 000 €* ne peuvent pas être « ventilés » pour identifier au sein de cet atelier les équipements concentrant les principales dépenses en terme de maintenance. Les résultats de ces analyses sont donc à relativiser mais permettent de souligner l'intérêt de disposer de données de qualité. La troisième étape de cette première phase aborde plus en détail cet aspect.

La deuxième étude de l'étape d'analyse microscopique s'effectue sur le terrain, au plus proche des employés. Nous nous sommes ainsi rapprochés des responsables maintenance et des différents chefs d'équipes. Bien que la méthode proposée par (Palmer, 2013) leur ait semblée pertinente pour estimer le « *wrench time* », ils ont préféré en faire fi et s'adresser aux équipes volontaires. De ce fait, lors du premier semestre 2018, nous avons pu suivre plusieurs équipes lors d'intervention de maintenance sur différents sites du SIAAP. Les équipes accompagnées étaient prévenues des raisons de notre présence. Au total, nous avons pu observer 70 heures d'intervention à travers les directions opérationnelles de Seine Centre (SEC - 35 heures observées), Seine Amont (SAM - 28 heures observées) et, la Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux (DSAR - 7 heures observées). Bien que cette méthode soit moins fiable que celle proposée par (Palmer, 2013), elle a permis d'estimer un « *wrench time* » global de 32 % et d'identifier les principales lacunes dans le processus de préparation-planification. La figure 58 détaille les résultats obtenus pour trois équipes. Sur l'usine Seine Centre, l'opération suivie consistait principalement à vidanger les pompes à boues et à changer deux pièces d'usure. Pour cette intervention le « *wrench time* » avoisine 35 % grâce notamment à une bonne planification de l'intervention. Ce facteur a permis de gérer la co-activité de l'atelier et de coordonner la mise à disposition des équipements avec les équipes d'exploitation. En revanche, suite à une préparation limitée par manque de retour d'expérience, une fois au pied de la machine, les techniciens de maintenance ont dû revenir à l'atelier et consacrer une demi-journée à usiner une pièce spécifique essentielle pour démonter une partie du piston.
Concernant la DSAR, une des caractéristiques est le temps de trajet nécessaire pour se rendre sur les lieux de l'intervention. L'intervention suivie consistait à remettre en place le moteur de ventilation d'un local technique en bord de Seine. A ce niveau, la co-activité est plus facilement gérable en raison de l'étendue du périmètre d'intervention. Bien que les interventions soient planifiées et connues à l'avance, la préparation des outils et des pièces détachées s'effectue uniquement le matin même, ce qui induit une perte de temps notable pour les techniciens (réservation du véhicule, outils spécifiques, etc.). L'autre aspect qui explique un « *wrench time* » - 25 % - plus faible, comparé à celui obtenu par les équipes sur les usines, est le temps de trajet incompressible. A ce niveau, les techniciens se rendent sur place et réalisent seulement

l'opération indiquée. Alors qu'une planification en amont, permettrait d'effectuer plusieurs opérations simultanément, et de limiter ainsi l'impact des temps de trajet sur le « *wrench time* ». L'intervention suivie pour la direction de Seine Amont concernait la plus petite usine du SIAAP : Seine Morée, où l'équipe de maintenance est constituée de six personnes et l'équipe d'exploitation de huit. A ce niveau, l'impact dû à une mauvaise préparation et planification est limité en raison de la taille du site, du faible nombre d'intervenants (en exploitation et maintenance) et de leur proximité. L'opération suivie consistait à remplacer à trois endroits les joints assurant l'étanchéité de la jonction entre les canalisations. L'estimation du « *wrench time* » pour cette intervention est de 44 %. Ce très bon résultat s'explique d'une part via la configuration de l'usine et d'autre part grâce à la planification réalisée par le responsable maintenance.

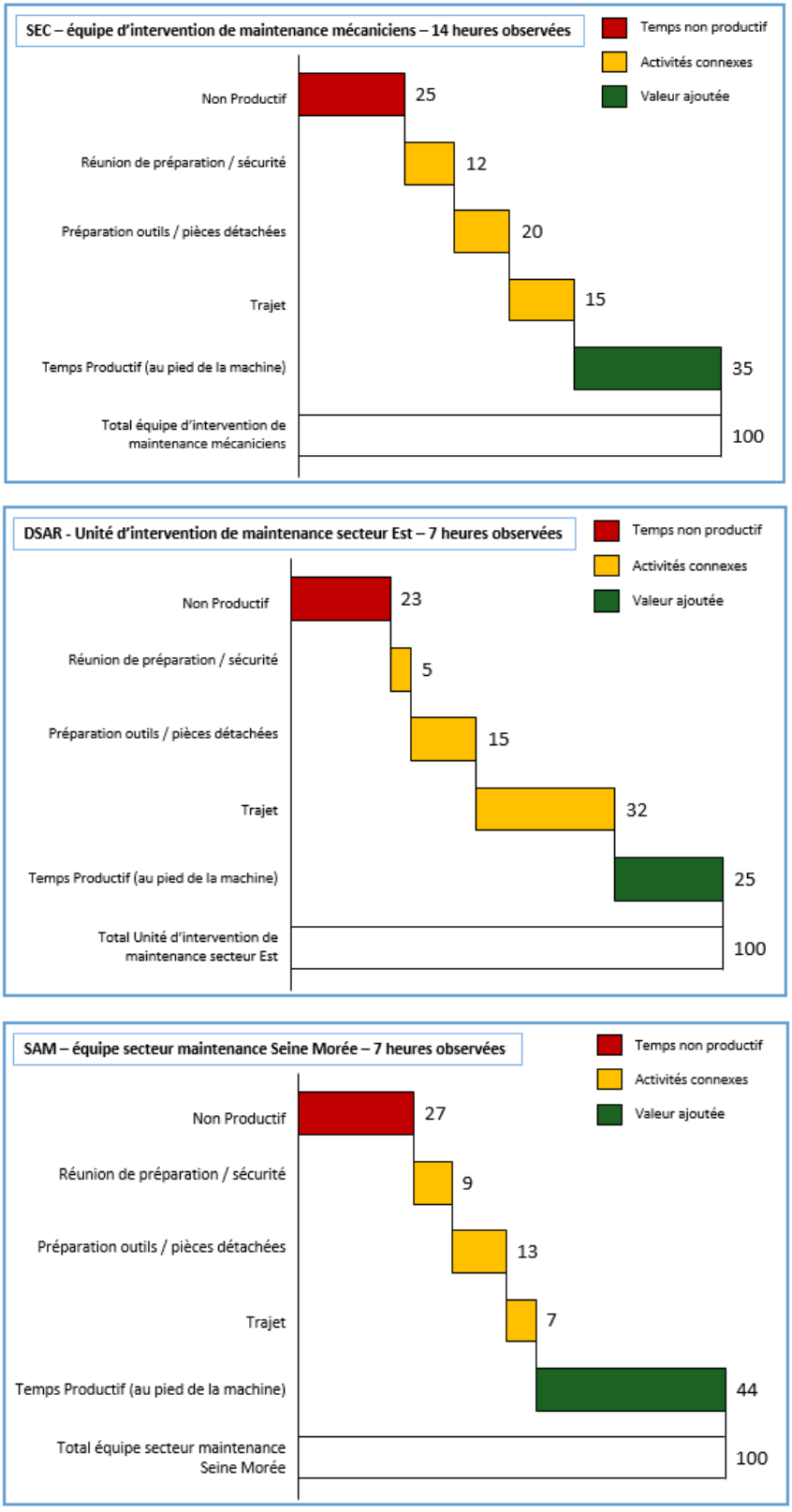


Figure 58: Répartition des temps d'intervention observés pour des équipes de SEC, SAM et la DSAR

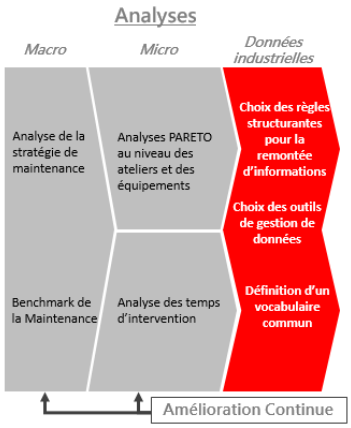
Dans l'ensemble, les démarches menées pour mettre en œuvre ces deux études prévalent autant que les résultats générés. L'analyse des temps d'interventions permet de se rapprocher des équipes opérationnelles et de comprendre leur

fonctionnement au quotidien. A ce titre, nous constatons que le potentiel d'optimisation lié à la préparation-planification s'avère d'autant plus élevé que la taille du site - et de ses effectifs - sont importants. L'enjeu à ce niveau réside essentiellement dans la direction de Seine Aval.

Cette deuxième étape permet d'obtenir une estimation du « wrench time » au SIAAP (32 %). En comparaison avec les meilleures pratiques de maintenance (55 %) identifiées dans la littérature (Palmer, 2013)*, cela montre tout le potentiel d'optimisation organisationnel de la maintenance au SIAAP. L'analyse de la répartition des ressources de maintenance, sur un périmètre donné, en fonction des équipements de production met en évidence le fait que 80 % des dépenses sont concentrées uniquement sur 138 équipements. Cette étape permet de caractériser à un instant donné certains aspects du fonctionnement de la maintenance de l'entreprise. Au-delà des résultats obtenus cette étape soulève la mauvaise – ou du moins l'incomplète – utilisation de la GMAO faite par le SIAAP qui nous amène à relativiser ces résultats. Ce premier contact avec la GMAO souligne le faible niveau de qualité des données présentes dans ce système d'information.*

3. Analyse de la qualité des données

L'analyse de la qualité des données s'intéresse aux données qui caractérisent les activités de maintenance ainsi que les outils permettant la gestion de ces données. Le SIAAP utilise depuis 2009 un outil de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur – GMAO – proposé par l'éditeur Carl Software. Le nombre de connexions journalières (figure 59) élevé – moyenne de 297 excepté le week-end – ainsi que le nombre d'interventions annuelles – 72 088 en 2017 – suivies via la GMAO (figure 60) traduisent la forte utilisation de cet outil par les différents acteurs de la maintenance au SIAAP. La figure 60 distingue les différentes « natures d'intervention » suivies dans la GMAO, correspondant dans la réalité aux différents types de maintenance. Ainsi, nous pouvons noter



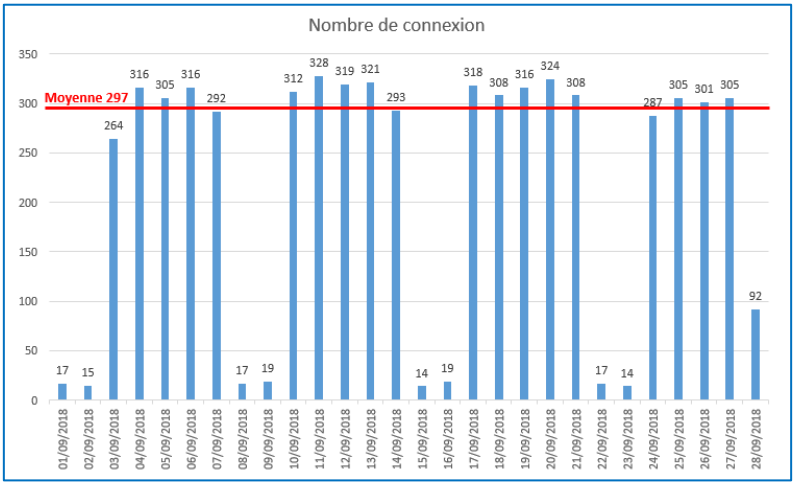


Figure 59: Détail quotidien du nombre de connexion à la GMAO sur le mois de septembre 2018

qu'en terme de nombre d'interventions, le ratio préventif / correctif est – avec une valeur approximative de 70 % / 30 % – proche des standards de maintenance identifiés dans la littérature.

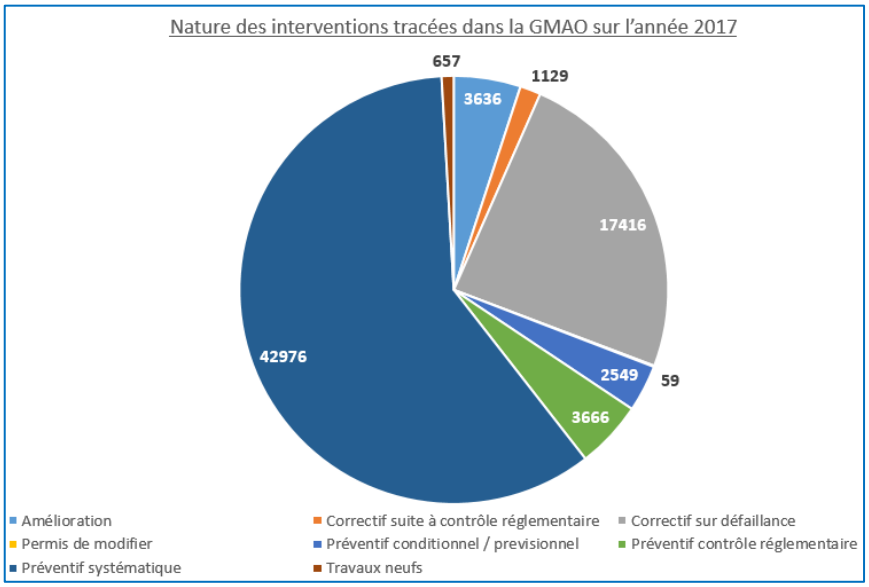


Figure 60: Répartition des interventions de maintenance effectuées sur l'année 2017 en fonction de leur nature - données issues de la GMAO du SIAAP

Les deux figures ci-dessus traduisent un ancrage prééminent de la GMAO dans les activités quotidiennes de maintenance ce qui conforte par ailleurs les choix des outils de gestion de données en terme de maintenance. De plus, l'analyse par direction opérationnelle effectuée au cours du premier semestre de l'année 2017 par le groupe de travail de l'action 32 – *Harmoniser l'utilisation de la GMAO sur l'ensemble des directions du SIAAP* – confirme cette impression. La figure 61 traduit, pour chaque direction opérationnelle du SIAAP, le niveau d'utilisation de certaines fonctionnalités de la GMAO.

Chaque fonctionnalité est évaluée sur une note de 0 à 10, établie à partir de deux critères principaux :

- Le niveau de complétude ;
- Le niveau d'utilisation.

Le détail des critères et des résultats obtenus par direction opérationnelle est présenté en Annexe 8. La synthèse de ces résultats (figure 61) souligne un niveau d'utilisation élevé, avec une moyenne globale obtenue de 7,4. Ils confirment également un certain degré d'hétérogénéité entre les pratiques d'utilisation de la GMAO selon les directions opérationnelles. Par exemple, la fonctionnalité « *Achats prestation* » semble être délaissée par le site Seine Centre.

A ce niveau, le constat principal est que l'outil de GMAO sert, au SIAAP, d'outil de référence en termes de suivi des activités de maintenance et compte un grand nombre d'utilisateurs (eu égard des effectifs du SIAAP).

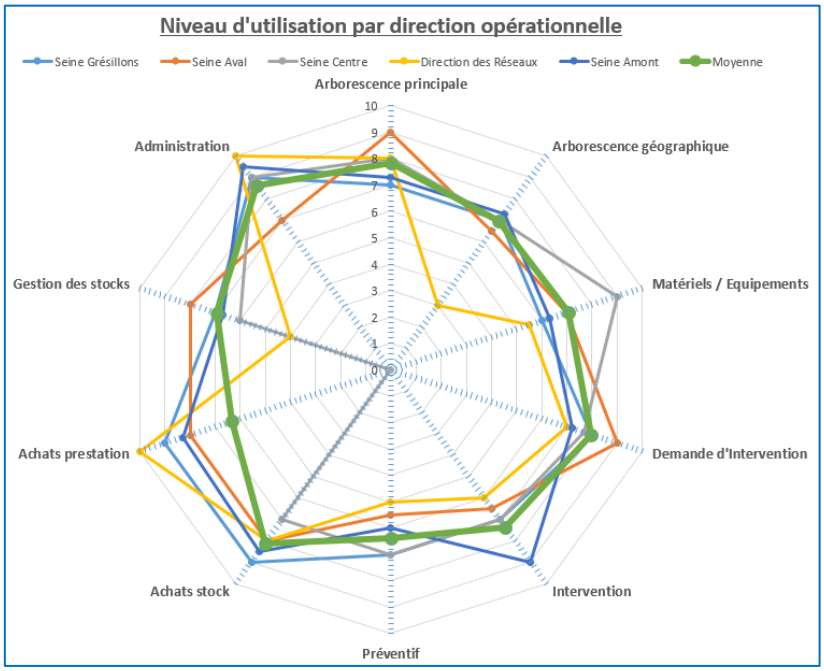


Figure 61: Evaluation du niveau d'utilisation de 10 fonctionnalités de la GMAO pour chaque direction opérationnelle du SIAAP

L'étape d'analyse microscopique de la maintenance avait déjà soulevé plusieurs lacunes concernant les données de la GMAO du SIAAP. Cette troisième étape d'analyse, spécifique à la qualité des données, permet de quantifier ces failles. Ainsi, à partir d'extractions de la GMAO, effectuées par l'administrateur central au premier semestre 2017, nous obtenons un bon aperçu du niveau de remplissage de données en GMAO. Le tableau ci-dessous regroupe cinq caractéristiques clés facilitant la gestion quotidienne des activités de maintenance.

Indicateurs	Seine Grésillons	Seine Aval	Seine Centre	Direction des Réseaux	Seine Amont
1. Ratio nombre d'interventions soldées avec occupation / nb. interventions soldées	52,58%	76,92%	85,44%	25,48%	52,99%
2. Ratio du nombre d'intervention avec une opération de préparation / nb. total d'intervention avec opération	0,75%	3,09%	0,00%	0,18%	0,11%
3. Nb de gammes avec achat article prévu / sur nb. de gammes total	0,05%	0,01%	0,00%	0,04%	0,00%
4. Ratio du nb. d'équipement avec une criticité cotée.	15,76%	80,91%	87,77%	21,58%	46,23%
5. Ratio nombre d'article sans référence fabricant / nombre total d'article			48,42%		

Tableau 15: Taux de remplissage en GMAO par direction opérationnelle de différentes caractéristiques nécessaires à la gestion des activités de maintenance

Le premier indicateur – *Ratio nombre d'interventions soldées avec occupation / nombre d'interventions soldées* – traduit l'implication des équipes d'intervention de maintenance dans une démarche d'amélioration continue, où la remontée d'informations du terrain est primordiale. Avec une seule direction opérationnelle où la valeur dépasse les 80 % (Seine Centre), les temps d'occupation sont globalement peu renseignés. Ici encore, la disparité des résultats montre la grande hétérogénéité de pratiques entre les directions opérationnelles du SIAAP. Le faible niveau d'informations contenues dans la GMAO amène à relativiser les résultats des analyses PARETO effectuées dans la partie précédente. Ces analyses se basant uniquement sur les données présentes dans la GMAO ; si seules 60 % des activités de maintenance y sont renseignées, alors les conclusions issues des analyses PARETO seront biaisées. Nous effectuons ce même constat lorsque nous nous intéressons à la répartition des coûts de maintenance selon la nature des interventions. Le tableau 16 regroupe, pour la direction opérationnelle de Seine Grésillons, les dépenses de maintenance en fonction de la nature des opérations. Nous notons qu'un peu de plus de 40 % des dépenses ne sont pas affectées à un type de maintenance (ligne grisée du tableau 16) ce qui, là encore, impacte fortement la qualité des analyses effectuées précédemment. Ces deux constats traduisent d'une certaine manière le faible niveau de formalisation des comptes rendus d'interventions et, de ce fait, la faible dynamique d'amélioration continue en place au SIAAP.

Libellé des opérations de maintenance	Montant
Amélioration	*348 881€*
Correctif suite à contrôle réglementaire	*36 108€*
Correctif sur défaillance	*1 344 940€*
Préventif conditionnel / prévisionnel	*468 265€*
Préventif contrôle réglementaire	*89 356€*
Préventif systématique	*396 136€*
Travaux neufs	*353 907€*
#N/A	*2 348 208€*
Total général	*5 385 801€*

Tableau 16: Répartition des dépenses de maintenance selon la nature des interventions - données issues de la GMAO du SIAAP entre le 01/01/2016 et le 31/08/2017

Les autres indicateurs présents dans le tableau 15 reflètent également une utilisation limitée de la GMAO par les équipes des méthodes de maintenance au SIAAP. Très peu d'informations utiles à la gestion quotidiennes des activités de maintenance y figurent. C'est le cas notamment pour les opérations de préparation – indicateur 2 – ou encore la gestion du réapprovisionnement des pièces détachées – indicateur 5. La criticité des équipements est également peu renseignée avec uniquement deux directions opérationnelles où le taux de remplissage dépasse les 80 %.

Cet indicateur souligne une fois de plus la forte hétérogénéité des pratiques d'utilisation de la GMAO au sein du SIAAP.

Le deuxième point de cette étape consiste à identifier les outils de gestion des données de maintenance et définir un ensemble de règles d'utilisation. Concernant les outils de gestion des données de maintenance, les figures 59 et 60 ont mis en évidence la forte utilisation de l'outil de GMAO Carl Source. Par conséquent, il semble peu judicieux de changer d'outil. En revanche, comme l'ont montré les tableaux 15 et 16, l'utilisation en l'état de la GMAO empêche de produire des analyses pertinentes et d'utiliser le progiciel GMAO comme un outil d'aide à la décision. De ce fait, il était légitime de définir clairement des règles communes d'utilisation de la GMAO. Pour y parvenir, nous avons réuni - à trois reprises au cours du deuxième semestre de l'année 2018 - les responsables des services méthode de maintenance et, un administrateur central de la GMAO. A partir des constats précédents, l'objectif était de définir un ensemble de règles cohérent à l'échelle du SIAAP, permettant d'assurer à la fois une homogénéité entre les données de la GMAO et une présence exhaustive des données utiles à la bonne gestion des activités de maintenance. Pour coller à la chronologie de notre méthodologie, cette clarification aurait dû survenir au début de l'année 2018, avant que les actions d'amélioration - telles que les analyses de criticité ou la maintenance conditionnelle - ne soient déjà bien avancées. Cette anticipation aurait permis de suivre avec plus précisément l'apport de ces actions. En revanche, les réflexions menées au travers de ces actions d'amélioration ont permis de faire évoluer la perception de la GMAO vis-à-vis des équipes de maintenance du SIAAP. Un réel besoin d'améliorer la qualité des données en GMAO a émergé et, a simplifié l'acceptation de la mise en œuvre de ces règles. Au total, dix règles ont été validées par le groupe de travail. Elles sont regroupées dans la figure 62 qui précise leurs priorités d'application. Ces règles s'adressent à la fois aux équipes d'intervention de maintenance et aux bureaux des méthodes de maintenance de chaque direction opérationnelle.

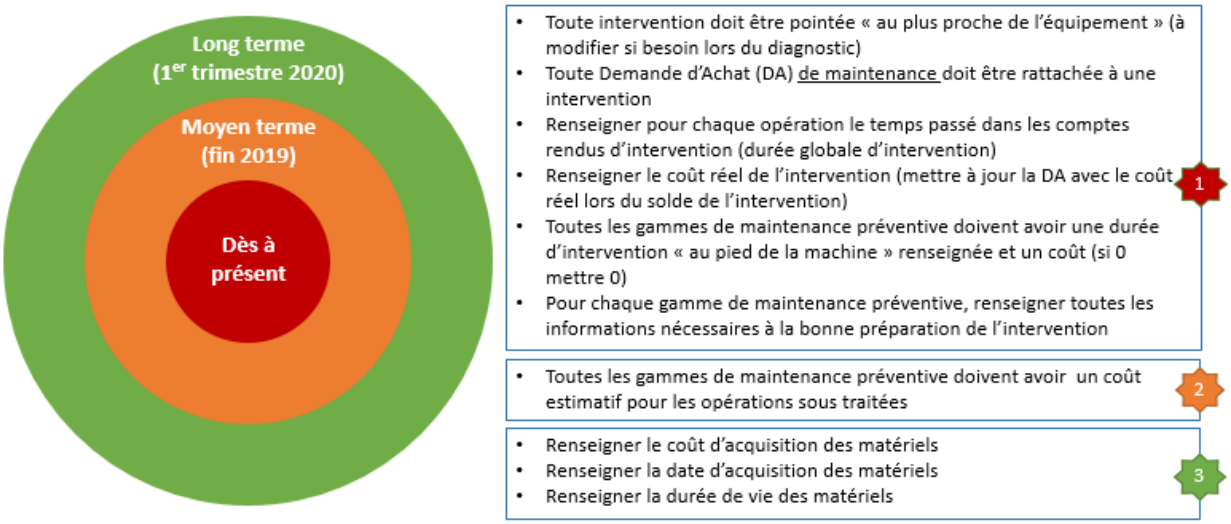


Figure 62: Liste des informations indispensables à renseigner en GMAO

Pour chaque des dix règles, un indicateur de suivi a été défini puis mis en œuvre (tableau 17).

Règles de remplissage de la GMAO	#	Indicateurs associés
Toute intervention doit être pointée « au plus proche de l'équipement » (à modifier si besoin lors du diagnostic)	I.	$\frac{Nombre\ d'interventions\ pointées\ au-delà\ du\ niveau\ 6}{Nombre\ total\ d'interventions\ soldées}$
Toute Demande d'Achat (DA) de maintenance doit être rattachée à une intervention	II.	$\frac{Nombre\ de\ DA\ (issues\ des\ marchés\ maintenance) reliées\ à\ une\ intervention}{Nombre\ de\ DA\ (issues\ des\ marchés\ maintenance)}$
Renseigner pour chaque opération le temps passé dans les comptes rendus d'intervention (durée globale d'intervention)	III.	$\frac{Nombre\ d'interventions\ \text{"terminé" ou "soldé"}\ avec\ un\ temps\ d'occupation\ renseigné\ (\neq\ 0\ ou\ NULL)}{Interventions\ \text{"terminé" ou "soldé"}}$
Renseigner le coût réel de l'intervention (mettre à jour la DA avec le coût réel lors du solde de l'intervention)	IV.	Nombre de Demande d'Achat acceptée sans numéro d'OS
Toutes les gammes de maintenance préventive doivent avoir une durée d'intervention « au pied de la machine » renseignée et un coût (si 0 mettre 0)	V.	$\frac{Gammes\ de\ maintenance\ préventive\ avec\ un\ temps\ prévu\ \neq 0}{Toutes\ les\ gammes\ de\ maintenance\ préventive\ actives\ au\ SIAAP}$
Pour chaque gamme de maintenance préventive, renseigner toutes les informations nécessaires à la bonne préparation de l'intervention	VI.	Nombre d'informations contenues dans les gammes de maintenance préventive : • Temps prévu ; • Prix du service • Code article réservé • Quantité d'articles réservés • Prix des fournitures
Toutes les gammes de maintenance préventive doivent avoir un coût estimatif pour les opérations sous traitées	VII.	$\frac{Nombre\ de\ gammes\ préventives\ \text{"maintenance external" avec un coût renseigné en GMAO}}{Toutes\ les\ gammes\ de\ maintenance\ préventives\ \text{"maintenance external" actives au SIAAP}}$
Renseigner le coût d'acquisition des matériels	VIII.	Nombre de matériels ayant un coût d'acquisition renseigné ($\neq 0$ ou NULL)
Renseigner la date d'acquisition des matériels	IX.	Nombre de matériels ayant une date d'acquisition renseignée ($\neq 0$ ou NULL)
Renseigner la durée de vie des matériels	X.	Nombre de matériels ayant une durée de vie renseignée ($\neq 0$ ou NULL)

Tableau 17: Liste des règles de remplissage de la GMAO et indicateurs associés

Ces indicateurs alimenteront l'étape de construction de tableaux de bord au sein de la troisième phase de notre méthodologie.

Enfin, le dernier point de cette troisième étape d'analyse consiste à définir un vocabulaire de maintenance commun à l'échelle du SIAAP. A ce niveau, nous nous sommes rattachés au groupe de travail de l'action 26 – *Harmoniser la politique de maintenance à travers les outils et les pratiques* – pour éclaircir certaines zones d'ombres apparues lors de l'étape d'analyse macroscopique, à la lecture des différents questionnaires. Ainsi, nous identifions trois points de vocabulaire à préciser dans la politique de maintenance :

- ***Les types de maintenance*** – définis au SIAAP par « nature des interventions » ; de nombreux techniciens mécomprennent la différence entre les interventions préventives systématiques et les conditionnelles.
- ***Les temps d'occupation –*** renseignés en GMAO ; selon les directions opérationnelles, une confusion existe entre le temps « au pied de la machine » et le temps global d'intervention.
- ***La notion d'Ordonnancement vs. Planification*** – nous utilisons dans la méthodologie le terme d'ordonnancement ; cependant, au vu des différents échanges lors des deux premières étapes de la méthodologie (questionnaire et interviews des responsables maintenance), le terme « Planification » semble être plus usité et mieux compris par les équipes de maintenance pour désigner les missions d'ordonnancement.

Ces trois aspects ont été discutés au sein de l'action 26, où des précisions ont été apportées par les représentants de chaque direction opérationnelle. Les explications et précisions nécessaires ont ensuite été diffusées lors du premier trimestre 2018 à l'ensemble des parties prenantes de la maintenance au SIAAP à travers un manuel de maintenance.

A l'issue de cette troisième étape, nous pouvons noter que l'outil de GMAO du SIAAP – Carl Source – est bien intégré dans les activités quotidiennes de maintenance. Cependant, l'utilisation de la GMAO en l'état freine la réalisation - dans les conditions optimales - des analyses nécessaires pour prendre les meilleures décisions face aux enjeux de la maintenance. L'outil de GMAO est utilisé uniquement comme un outil de suivi des activités de maintenance ; il ne joue pas pleinement son rôle d'outil d'aide à la décision.

Synthèse de la première phase de la méthodologie

Cette phase d'analyse nous a permis à la fois de comprendre le fonctionnement global de la maintenance au sein du SIAAP et d'identifier le potentiel d'optimisation pour la maintenance. La première étape d'audit a mis en évidence de nombreuses lacunes dans la gestion des activités de maintenance mais également plusieurs leviers d'amélioration. Ces leviers seront en partie repris lors de la deuxième phase de notre méthodologie. Lors de la deuxième étape nous nous sommes rapprochés des équipes de maintenance pour quantifier à l'instant To l'impact sur le terrain de la stratégie de maintenance du SIAAP. Les résultats de ces analyses

seront exploités dans la phase suivante. Ces analyses ont soulevé plusieurs écueils concernant le suivi d'informations nécessaires au pilotage des activités de maintenance. La troisième étape nous a ainsi permis de définir les règles d'utilisation de la GMAO pour garantir la remontée de ces informations.

III. Deuxième phase : outils d'optimisation de la maintenance

A travers cette deuxième phase de la méthodologie (rappelée en figure 63), nous construisons les outils d'optimisation de la maintenance adaptés à la situation du SIAAP pour d'une part améliorer l'efficacité de la maintenance et d'autre part améliorer son efficience. Afin de déployer ces étapes à l'ensemble des directions opérationnelles, nous nous appuyons sur certains Groupes de Travail du projet *SIAAP 2030*. L'annexe 5 détaille la mise en œuvre de ces différentes étapes en lien avec les actions du projet stratégique.

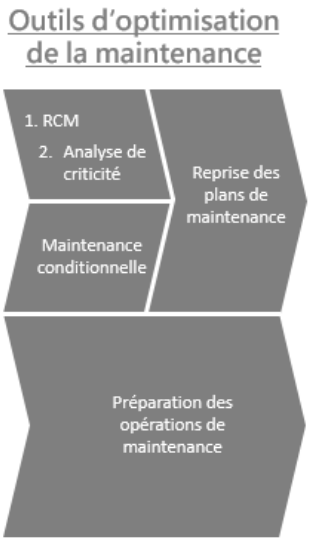
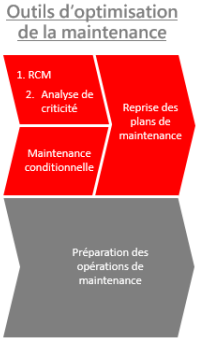


Figure 63: Rappel de la deuxième phase de la méthodologie présentée au chapitre 2

1. Améliorer l'efficacité de la maintenance



Pour mettre en œuvre les différents outils d'optimisation permettant d'améliorer l'efficacité de la maintenance, nous nous appuyons sur les groupes de travail des actions 28 – *Définir et mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de la criticité des équipements* – et 30 – *Améliorer et développer la maintenance conditionnelle* – du projet *SIAAP 2030*.

La phase d'analyse de la méthodologie a montré que de nombreuses études AMDEC avaient été principalement réalisées lors des phases de conception et de réception des installations. Par conséquent, nous avons pu directement adapter la méthodologie

d'évaluation de la criticité des équipements aux enjeux du SIAAP. Les profils présents dans le groupe de travail de l'action 28 sont des responsables des services méthodes de maintenance, des responsables maintenance, des responsables d'exploitation et, des ingénieurs en sûreté de fonctionnement. La méthodologie retenue s'inspire de celle d'Yves LAVINA (Lavina, 2005) et s'adapte au contexte du SIAAP. Ainsi, quatre critères sont retenus pour définir la criticité des équipements :

- La **gravité de la Panne** sur l'atelier ;
- L'**Importance de l'équipement** sur le process de production ;
- L'**impact Economique** potentiel (estimation de la valeur de l'équipement) ;
- Le **taux d'Utilisation** de l'équipement.

Nous avons veillé à conserver l'acronyme « PIEU » pour désigner la méthodologie d'évaluation de la criticité des équipements. Le principal changement vis-à-vis de la méthodologie de (Lavina, 2005) concerne l'**E**tat de l'équipement, remplacé ici par l'impact **E**conomique. Cette adaptation est due principalement au faible niveau de connaissances et d'informations dont dispose le SIAAP vis-à-vis de ses équipements. La criticité jouant un rôle central dans notre méthodologie, il est capital qu'elle soit comprise et acceptée par toutes les parties prenantes, notamment les équipes « exploitation ». Dans cette optique la pondération du critère « **I**mportance de l'équipement sur le process de production » a été définie en concertation avec l'exploitation. L'annexe 10 détaille la matrice d'évaluation des quatre critères de la méthodologie PIEU et, présente les règles de calcul à appliquer pour définir la criticité des équipements du SIAAP. Nous distinguons trois niveaux de criticité :

- Critique ;
- Important ;
- Secondaire.

Une fois la méthodologie d'évaluation de la criticité complétement définie, nous avons – à l'aide du tableau 10 – défini les règles de disponibilités communes, en lien avec l'exploitant. L'objectif ici était d'accorder les services maintenance et exploitation sur une durée acceptable de remise en état selon la criticité des équipements. Ce facteur permet de définir un ordre de priorité pour les interventions correctives. L'impact de la criticité sur la gestion des interventions correctives se répercute sur la gestion des stocks de pièces détachées. Le délai de remise en état des équipements dépend souvent du délai de réapprovisionnement des pièces de rechange. Pour pouvoir tenir les délais – particulièrement pour les équipements dits critiques –

il importe de réorganiser la gestion des stocks en magasin en fonction de la criticité établie. De même, nous définissons les ordres de grandeur des périodicités des plans de maintenance préventive systématique afin d'adapter l'effort de maintenance au juste besoin. Ce paramètre se traduira dans la reprise des plans de maintenance qui s'effectuera en lien avec les avancées du déploiement de la maintenance conditionnelle. La figure 64 regroupe les règles retenues pour la gestion des activités de maintenance en fonction de la criticité des équipements. Ce tableau a été communiqué à l'ensemble des directions opérationnelles dans le cadre de l'action 26 via la diffusion du manuel de maintenance.

Classification équipement	Intervention de maintenance corrective	Plan de maintenance préventive systématique [1]	Gestion des stocks magasin
Critique	Prise en charge immédiate en lien avec l'exploitant pour remise en état dans les meilleurs délais	Périodicité des interventions : conforme aux préconisations constructeur/SIAAP	Disponibilité des pièces de rechanges en magasin (seuil critique)
Important	Remise en état < 2 semaines (indicatif) [2]	Périodicité des interventions : élargie au juste nécessaire (ou échange standard) dans un objectif de maîtrise budgétaire	Disponibilité des pièces de rechanges au magasin, à l'échelle du SIAAP ou via le fournisseur
Secondaire	Remise en état < 8 semaines (indicatif) [2]	Périodicité des interventions : minimale en respect des réglementations	Consommables et pièces d'usure en magasin Pièces détachées sur commandes

[1] Hors maintenance conditionnelle et hors maintenance de niveau 1 et 2 (qui reste inchangée)
[2] La priorité d'intervention dépend aussi d'autres facteurs (risque pour les personnes et les biens, arrêts programmés d'équipements, ...) qui sont pris en compte dans la planification

Figure 64: Synthèse des règles de prise en compte de la criticité dans la gestion de la maintenance

Une fois les règles de cotation et les impacts sur la gestion quotidienne des activités de maintenance établis, nous avons débuté l'étude de criticité auprès des différentes directions opérationnelles. Pour valider la pertinence de la méthodologie, nous avons préférentiellement axé l'étude sur un périmètre restreint. A ce stade, l'objectif était de s'assurer que l'étude de criticité retenue permette de discriminer suffisamment les équipements pour obtenir une répartition proche de :

- 20 % équipements critiques ;
- 30 % équipements importants ;
- 50 % équipements secondaires.

Cette angle d'analyse permet également d'observer comment les équipes de maintenance et de production des sites s'approprient la méthodologie de cotation et, d'estimer ainsi la durée nécessaire pour passer en revue la totalité des équipements de production. Nous avons donc entamé les analyses de criticité sur l'usine Seine Morée – la plus petite *(quant à sa superficie*

et sa capacité de traitement) des six usines du SIAAP – en novembre 2017. Un groupe de travail composé de six personnes se réunissait de manière hebdomadaire :

- La directrice de l'usine ;
- Le responsable maintenance de l'usine;
- Une personne du service des méthodes de maintenance de l'usine ;
- La responsable de production de l'usine et son adjointe ;
- Un ingénieur maintenance.

Pour déployer l'analyse de criticité, nous utilisons une approche par atelier fonctionnel, en se basant sur les P&ID[16] des usines et des réseaux d'assainissement. L'ingénieur maintenance veille à garantir l'application homogène de la méthodologie entre les différentes directions opérationnelles. A ce titre, il anime les premières séances : il présente, explicite et illustre la méthodologie PIEU aux participants du groupe de travail. Une fois la méthodologie assimilée et appliquée par ces derniers, l'ingénieur maintenance se retire des groupes de travail et délègue l'animation des réunions à un employé du service des méthodes de maintenance. Précisons que le service méthode de maintenance joue un rôle essentiel tout au long de la mise en œuvre de la méthodologie. En amont des réunions, il prépare la documentation nécessaire – P&ID de l'atelier étudié, TAG[17] GMAO des équipements concernés, historiques des analyses précédentes – pour faciliter les échanges. Pendant la réunion, il assure l'impartialité des échanges entre les services maintenance et production. Enfin, à l'issue des réunions, ils constituent les fichiers d'import pour intégrer en GMAO la criticité des équipements. La figure 65 retrace ces principales étapes.

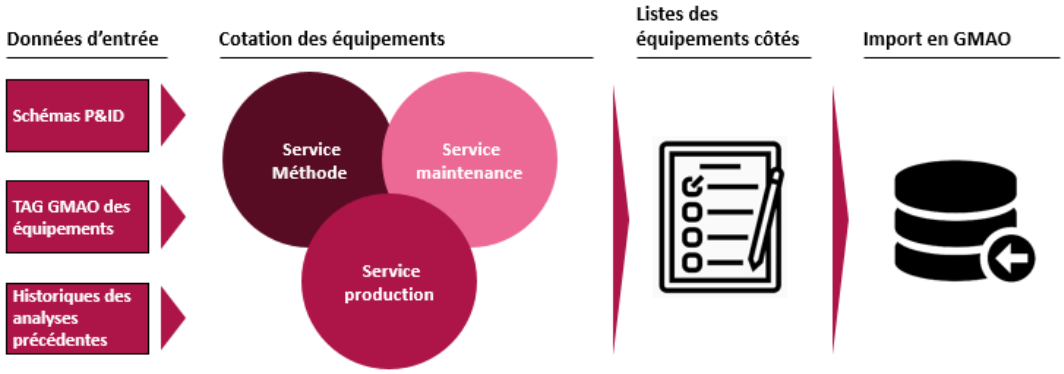


Figure 65: Principales étapes du déploiement de l'analyse de criticité

[16] *Piping & Instrumentation Diagram* – en français, schéma tuyauterie et instrumentation – est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé industriel.
[17] *TAG* est un terme associé à de l'information qui décrit l'objet ou une caractéristique de l'objet et, facilite le regroupement des informations liées à cet objet ou caractéristique.

Concernant les services maintenance et production, il est indispensable de s'entourer du personnel qui côtoie quotidiennement les équipements analysés. Ainsi, en fonction des ateliers étudiés, certaines personnes rejoindront le Groupe de travail. Ce fonctionnement mis en œuvre sur l'usine Seine Morée sera par la suite répliqué – moyennant quelques ajustements – sur l'ensemble des autres directions opérationnelles. Le principal point discriminant est la présence – ou l'absence – d'études de criticité récentes (la phase d'analyse a montré la présence d'AMDEC sur certaines directions). Certains des critères utilisés dans ces précédentes analyses peuvent s'assimiler à ceux utilisés par la méthodologie PIEU définie (ceci concerne bien souvent le premier critère « gravité de la **P**anne sur l'atelier »).

La totalité du personnel de l'usine Seine Morée compte 17 employés. Les participants au groupe de travail maîtrisaient le fonctionnement de l'usine ; leur connaissance a facilité le déploiement de la méthodologie. Ainsi après six mois, nous avions analysé la majeure partie de l'usine, soit environ 4 000 équipements. Les résultats de cette analyse sont repris en figure 66. La répartition obtenue valide la pertinence de la méthodologie retenue qui peut ensuite être déployée à l'ensemble du SIAAP. Pour suivre l'avancée de cette action, nous observons le nombre d'équipements avec une criticité « PIEU » renseignée en GMAO.

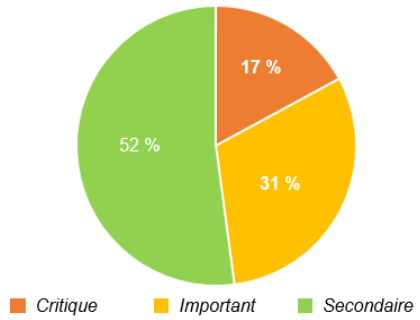


Figure 66: Répartition des équipements de l'usine SEM en fonction de leur criticité

La mise en œuvre de l'analyse de criticité à l'échelle du SIAAP aura nécessité deux années de travail et d'implication de la part des services méthodes, production et maintenance. A ce jour, un peu plus de 105 000 équipements possèdent une criticité « PIEU » renseignée en GMAO soit, plus de 89 % de la totalité des équipements. Seule la direction des réseaux doit poursuivre ses efforts à ce niveau (58,04 % d'équipements avec une criticité renseignée). Au-delà du rôle capital qu'occupe la criticité dans la suite de notre méthodologie, ces analyses ont permis d'améliorer la connaissance globale du patrimoine du SIAAP. Les analyses effectuées en groupe de travail ont permis à la fois de recenser certains équipements dans l'outil de GMAO, et aussi de mieux comprendre l'impact des équipements - d'un point de vue global - au niveau des ateliers et des usines de production.

Le deuxième outil mis en œuvre pour améliorer l'efficacité de la maintenance est la maintenance conditionnelle. Le groupe de travail de l'action 30 – composé essentiellement de techniciens et de responsables maintenance – a défini une méthodologie de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle en neuf étapes (figure 67).

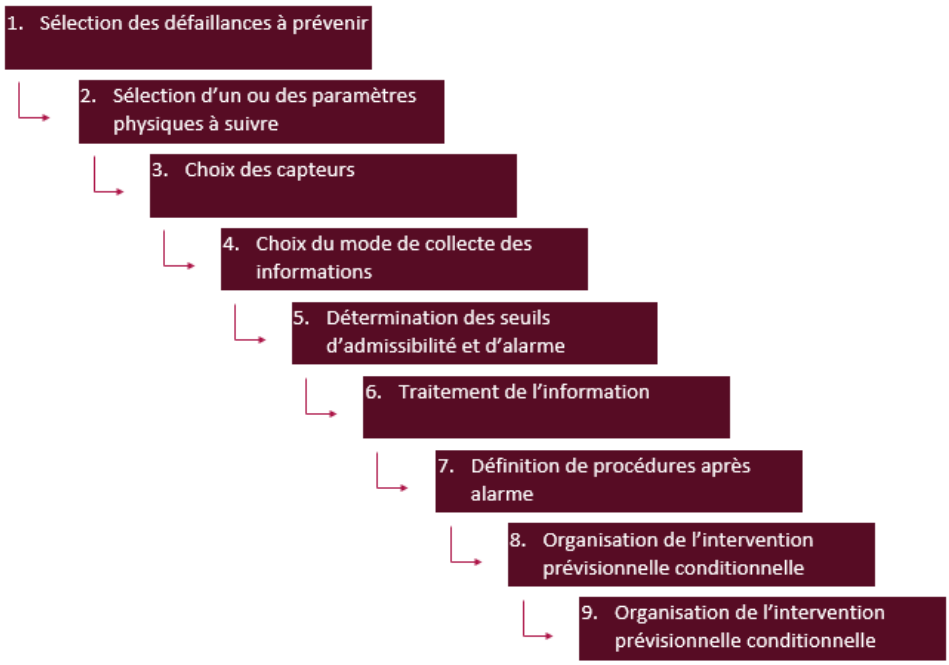


Figure 67: Etapes de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle au SIAAP

La sélection des défaillances à prévenir cherche à identifier les défaillances dangereuses, coûteuses et / ou répétitives, en mettant à contribution les historiques des pannes issus de la GMAO et l'expérience des techniciens. La deuxième étape veille à définir les paramètres à suivre. Pour cela, trois points d'attention ont été identifiés. Les paramètres doivent être :

- ***Observables ou mesurables*** ;
- ***Significatifs de l'évolution du mode de défaillance à anticiper*** ;
- ***Interprétables*** – c'est-à-dire qu'ils permettent d'établir une corrélation entre la mesure et l'état interne de l'équipement.

Une fois les paramètres identifiés, le choix des capteurs est effectué parmi les différentes solutions technologiques existantes. La quatrième étape consiste à choisir le mode de collecte des informations. La collecte peut être réalisée soit par ronde, soit de manière continue via la télésurveillance, ou par un mixte de ces deux approches. Le choix dépend principalement de deux critères :

- ***Un critère économique*** – le coût de main d'œuvre par technicien pour réaliser les opérations de maintenance préventive récurrentes à corréler avec un investissement initial d'instrumentation pour réaliser la maintenance conditionnelle ;
- ***La cinétique d'apparition du défaut*** – dans le cas d'un défaut avec une cinétique d'apparition rapide, un monitorage - pouvant aller jusqu'à de la sécurité machine - peut être mis en œuvre.

Ces quatre premières étapes ont permis d'identifier – à l'échelle du SIAAP – un premier périmètre d'équipements, composés d'environ 8 000 pompes, sur lesquelles appliquer des analyses vibratoires. Un recensement par site du matériel de mesure nécessaire à ces analyses a également été effectué.

La cinquième étape consiste à définir les seuils d'admissibilité et d'alarme ce, à partir d'une prise de référence initiale – la signature vibratoire de la machine – qui caractérise le fonctionnement « normal » de la machine. Le seuil d'admissibilité est défini en fonction des contraintes règlementaires et des recommandations des constructeurs de machine. Le second seuil est quant à lui défini à partir du seuil d'admissibilité en considérant la vitesse de dégradation et le temps de réaction pour intervenir. L'étape suivante concerne le traitement de l'information collectée. Au niveau des sites, la surveillance est réalisée par des techniciens qui collectent les informations avant d'interpréter l'évolution des défauts et déclencher l'intervention préventive conditionnelle. En cas de besoin d'une expertise poussée, la cellule centrale de maintenance conditionnelle est sollicitée pour émettre une décision. Ce deuxième niveau occupe un rôle d'expertise permettant d'effectuer des analyses approfondies et assure une coordination des différentes activités de maintenance conditionnelle à travers les directions opérationnelles du SIAAP.

Ces deux étapes impliquent d'une part, la maîtrise de nouvelles compétences pour les équipes de maintenance et d'autre part, la répartition de ces compétences au sein des sites du syndicat. A ce jour, seuls deux sites pilotes – SAV et SEC – ont pu former une partie de leurs équipes au cours du deuxième trimestre 2018. Les campagnes de mesure ont débuté seulement un an après – une fois le matériel réceptionné – en priorisant les équipements relevant – à court terme - de lourdes opérations de maintenance préventive. D'un point de vue organisationnel, les équipes du SIAAP réalisent les mesures en local et l'entreprise SKF[18] (sollicitée pour les analyses

[18] *Svenska Kullager Fabriken*, ou SKF, est un groupe multinational suédois, leader mondial dans le domaine du roulement mécanique. Il est également spécialisé dans les systèmes de maintenance conditionnelle.

spécifiques et les formations du personnel) assure la mission d'expertise. Ce point sera abordé plus en détail dans la troisième phase de la méthodologie.

La septième étape consiste à rédiger les procédures à appliquer lorsque le niveau d'alarme est atteint. En se basant sur les recommandations des constructeurs et les conditions d'exploitation, les services méthodes de maintenance adaptent les plans de maintenance. Cette étape fait partie intégrante de notre méthodologie et s'effectue en lien avec les résultats de la criticité. Les plans de maintenance actualisés serviront de point de départ pour préparer puis programmer les interventions de maintenance conditionnelle (étape 8 de la figure 67). Enfin la dernière étape vise, à partir du retour d'expérience, à faire évoluer les valeurs des différents seuils pour se rapprocher davantage du comportement du système. Pour suivre l'avancée de cette action, nous considérons le nombre de gammes de maintenance préventives conditionnelles renseignées en GMAO.

A ce jour, le déploiement de la maintenance conditionnelle sur l'ensemble des directions opérationnelles n'est pas effectif, et toutes les compétences nécessaires ne sont pas encore présentes. Cependant, la réalisation d'analyses vibratoires sur l'année 2018 – sous-traitées à une entreprise prestataire – a permis de repousser certaines opérations de maintenance préventives systématiques et ainsi, d'économiser 213 k€ sur l'année considérée. Ce bénéfice constitue un véritable « gain rapide » permettant de maintenir une dynamique de changement. Enfin, les premières mesures réalisées en 2019 par les employés du SIAAP sur le site de Seine Aval ont permis non seulement de réaliser davantage d'économies, mais surtout d'obtenir une meilleure connaissance des équipements.

L'étape de reprise des plans de maintenance s'appuie sur les contributions des deux outils d'amélioration de la maintenance utilisés précédemment avec notamment, un impact important de la criticité dans la priorisation de cette étape. De ce fait, la reprise des plans de maintenance est aussi portée par le groupe de travail de l'action 28. Pour réaliser rapidement des gains économiques et maintenir une dynamique de changement positive, nous priorisons la reprise des plans de maintenance à l'aide de la criticité. A partir de plusieurs classements d'équipements réalisés lors de la phase d'analyse, nous les « croisons » avec la criticité des équipements pour obtenir des histogrammes tels que celui présenté en figure 68. Nous identifions ainsi les équipements où l'effort de maintenance est inadapté aux enjeux du SIAAP. Deux cas sont distingués et des actions identifiées :

- Les équipements « secondaires » et « importants » avec des coûts de maintenance préventive significatifs : diminuer si possible la fréquence des opérations préventives identifiées ;

- Les équipements critiques avec des coûts de maintenance préventive faibles ou inexistants : s'assurer de mettre les moyens nécessaires pour garantir le niveau de disponibilité de l'équipement souhaité.

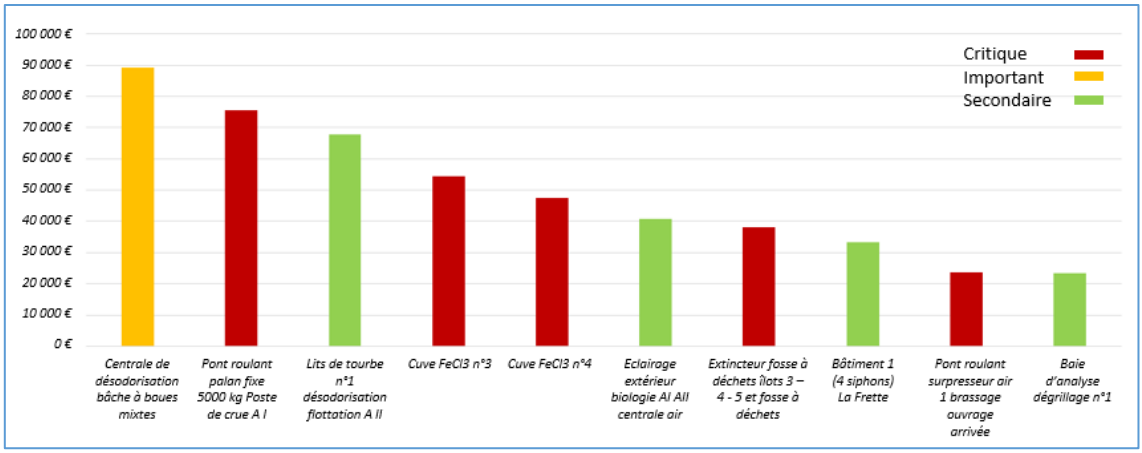


Figure 68: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance préventive des équipements des ateliers du prétraitement, de la clarifoculation, de la biologie et de La Frette de l'usine Seine Aval, croisé avec le niveau de criticité – zoom sur le début de ce classement

Nous réalisons le même type d'analyse avec le critère de temps d'intervention. Ces analyses sont réalisées pour l'ensemble des directions opérationnelles du SIAAP. Un point de vigilance est apporté aux équipements suivis par des techniques de maintenance conditionnelle afin d'éviter toute forme de redondance avec des opérations préventives systématiques.

La reprise des plans de maintenance vient concrétiser, d'un point de vue ressources, les étapes d'analyse de criticité et de déploiement de la maintenance conditionnelle. A partir de ces deux actions, nous redéfinissons les fréquences des opérations de maintenance préventive, et plus globalement, réduisons la quantité de maintenance préventive nécessaire pour atteindre les objectifs du SIAAP. Mécaniquement, cette adaptation permet de réduire les dépenses (pièces détachées, prestation extérieure, etc.) et le temps de main œuvre requis pour réaliser les opérations de maintenance. La figure 69 illustre cet effet.

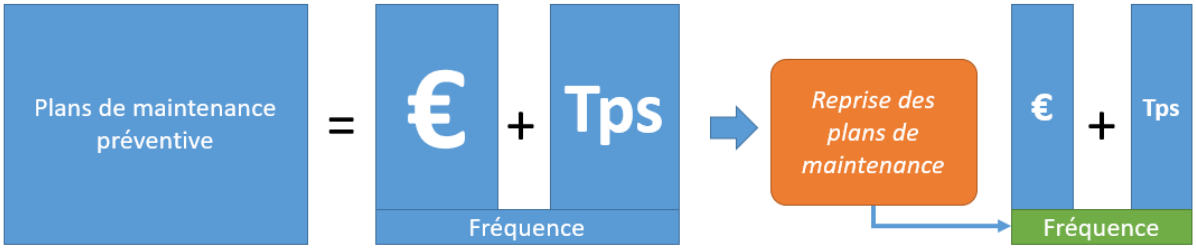


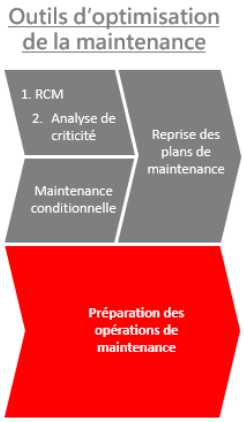
Figure 69: Schématisation de la reprise des plans de maintenance au SIAAP

Dans le cas de notre expérimentation sur le SIAAP, le faible niveau d'informations présentes dans le système de GMAO ne permet pas de quantifier proprement le gain issu de ces actions. En effet, sur de nombreuses gammes de maintenance préventive, il manque les données « temps d'occupation ». Ce constat a amené une véritable prise de conscience de la part des responsables maintenance quant à l'intérêt de stocker des données de qualité dans le système de GMAO et, a favorisé la mise en place des dix indicateurs de remplissage de la GMAO présentés dans le tableau 17. Les plans de maintenance - base à la préparation et à la planification des opérations de maintenance -requièrent la présence d'un minimum d'information pour réaliser ces étapes. L'étape de formalisation du processus de préparation des opérations de maintenance – lancée en parallèle des étapes d'analyse de criticité et de maintenance conditionnelle – permet d'identifier ces informations (nous présentons la mise en place de cette étape dans la section suivante). Ainsi, la reprise des plans de maintenance au SIAAP permet d'une part, de définir les fréquences des opérations de maintenance préventive adaptées aux enjeux du syndicat et d'autre part, d'actualiser le niveau d'information des gammes de maintenance. Parmi ces informations, nous retrouvons notamment le temps prévu pour effectuer une gamme de maintenance. Les indicateurs 6, 7 et 8 définis lors de la première phase de la méthodologie permettent de suivre l'avancée de cette étape.

La reprise des plans de maintenance concrétise l'apport des étapes d'analyse de criticité et de maintenance conditionnelle dans le fonctionnement quotidien des activités de maintenance. Elle actualise les plans de maintenance des infrastructures de production dans l'outil référent en terme de gestion de la maintenance. Dans le cadre du SIAAP, la mauvaise utilisation de l'outil de GMAO a demandé un effort préalable concernant la mise à jour des informations capitales pour le bon fonctionnement de la maintenance. Aujourd'hui, ce niveau a considérablement augmenté et doit encore progresser.

2. Améliorer l'efficience de la maintenance

Pour améliorer l'efficience de la maintenance, nous proposons dans notre méthodologie de formaliser l'étape de préparation des opérations de maintenance. Pour parvenir à mettre en œuvre cette étape au sein du SIAAP et ainsi l'expérimenter, nous nous appuyons sur le groupe de travail issu de l'action 31 – *Homogénéiser, améliorer et mieux formaliser la planification de la maintenance en s'appuyant sur la GMAO* – composé essentiellement de chefs d'équipes de maintenance et de techniciens des services méthodes de maintenance.



A partir des recommandations de la méthodologie et, en considérant la politique de sécurité du SIAAP – symbolisée par le triangle du « PEUX » sur la figure 70 – le groupe de travail a identifié les informations indispensables à la bonne tenue des opérations de maintenance. La figure 70 réunit ces informations en deux points. Nous distinguons d'une part, le périmètre de l'intervention avec l'équipement concerné et son environnement et d'autre part, les opérations à réaliser et les conditions nécessaires pour les mener à bien.

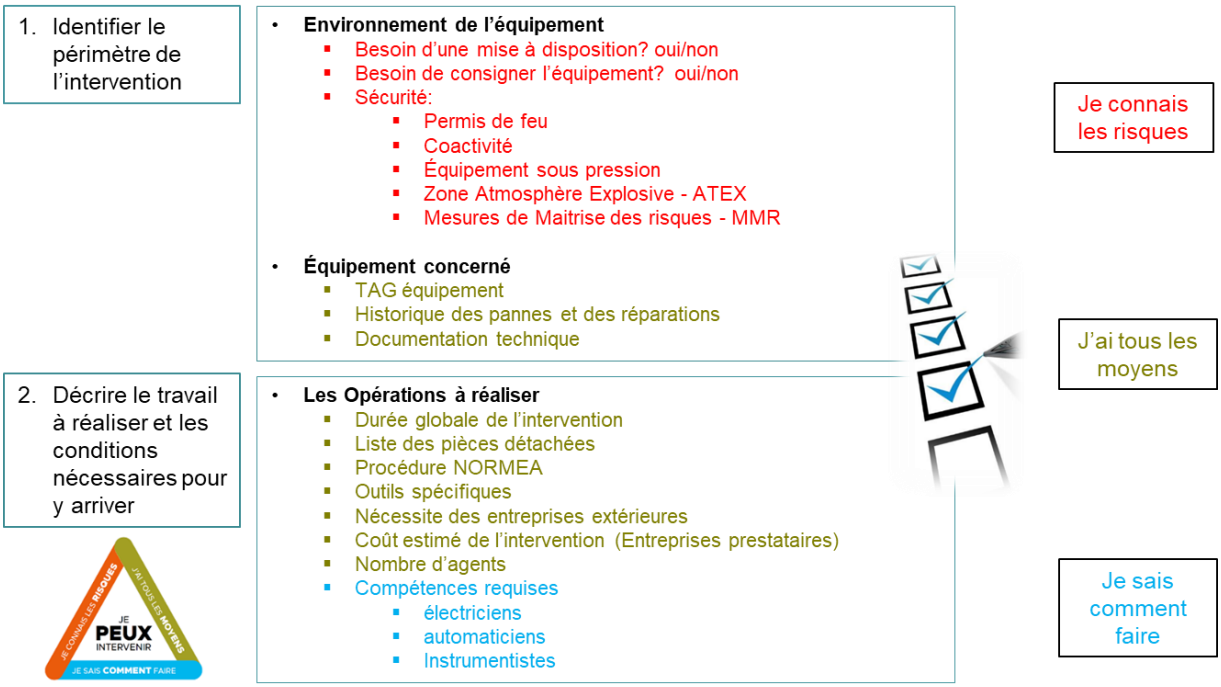


Figure 70: Liste des informations nécessaires à la bonne tenue des opérations de maintenance

A présent, l'enjeu pour chaque direction opérationnelle du SIAAP est de définir son propre fonctionnement pour :

- S'assurer que les conditions logistiques, identifiées comme indispensables à la bonne tenue de l'opération soient réunies ;
- Actualiser ces informations une fois l'opération réalisée.

A ce niveau deux cas de figure se présentent : d'une part, les interventions de natures correctives et d'autre part, les interventions de natures préventives. Pour ces dernières, les conditions logistiques essentielles à la bonne tenue des interventions sont identifiées dans les gammes de maintenance. En revanche, pour les interventions correctives ces informations doivent être identifiées par le préparateur en se basant à la fois sur la Demande d'Intervention – DI – l'historique des opérations réalisées sur l'équipement, la documentation du constructeur et son expérience. Fort de ce précepte, chaque direction opérationnelle a identifié les missions du

préparateur ainsi que son périmètre d'intervention. La figure 71 présente pour l'usine Seine Morée les principales missions du préparateur et les objectifs associés.

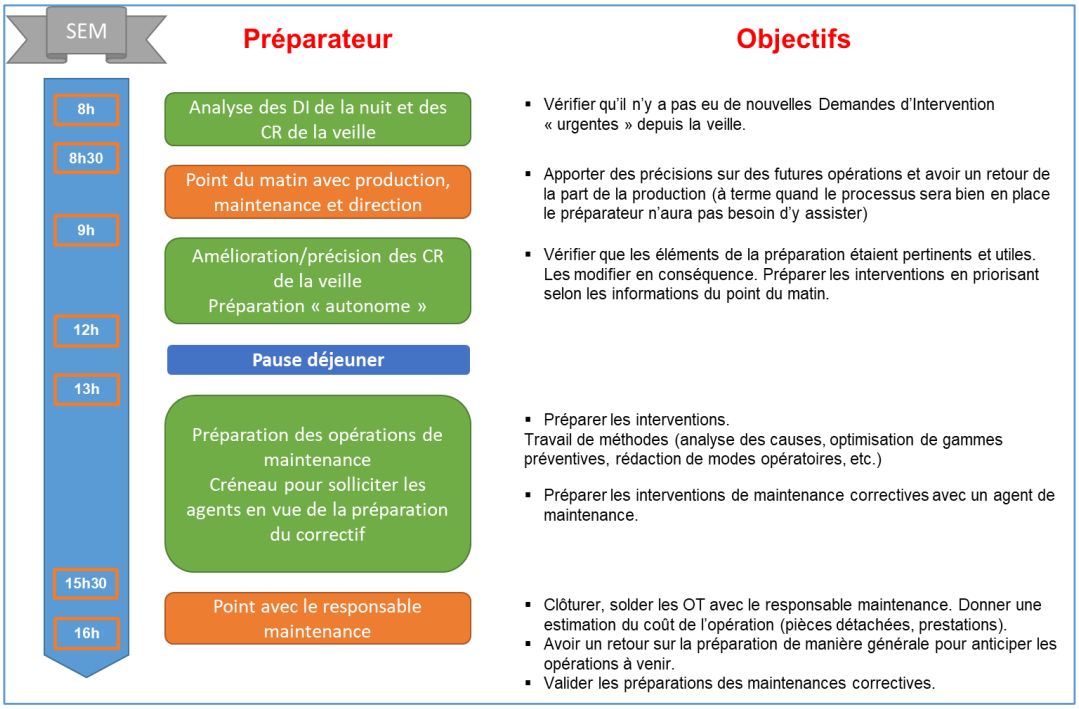


Figure 71: Journée type du préparateur sur l'usine Seine Morée

Les effectifs sur cette usine étant relativement faibles, atteindre un niveau élevé de formalisation de l'interface entre le responsable maintenance [19]et le préparateur importe peu. En revanche, il est capital d'identifier des temps d'échange (représentés en orange sur la figure 71) entre ces deux fonctions : ils permettent le partage d'informations utiles pour assurer le bon fonctionnement du processus maintenance. Il en est de même avec les techniciens maintenance où un temps d'échange est prévu pour préparer au mieux les interventions correctives. Dans cette configuration, le préparateur dispose d'un degré d'autonomie relativement large pour réunir les conditions identifiées dans la figure 70 et assurer ainsi la préparation des interventions de maintenance.

Concernant l'usine Seine Aval (SAV) – qui regroupe plus d'un tiers des effectifs du SIAAP – le rôle et les interfaces du préparateur doivent être davantage formalisés. En effet, avec le préparateur, nous identifions au total sept fonctions à impliquer dans la préparation des interventions de maintenance. Pour clarifier le rôle de chacun, nous utilisons un RACI dont les résultats – spécifiques au Service 2 de l'usine SAV – sont présentés dans un tableau en annexe 11. Ce niveau de formalisation met en évidence deux points essentiels : les missions et la place

[19] Sur l'usine Seine Morée, le responsable maintenance de l'usine occupe également les fonctions de chef d'équipe maintenance.

du préparateur. Premièrement, le préparateur - bien que responsable d'identifier les conditions nécessaires à la bonne tenue des opérations de maintenance - doit en revanche s'appuyer sur un grand nombre de personnes pour réunir ces conditions. En ce sens, il pilote la préparation des interventions de maintenance. Deuxièmement, l'interface la plus forte est avec les responsables d'équipe maintenance et les chargés d'opérations[20], responsables de réunir la plupart des conditions permettant de valider la préparation des opérations de maintenance.

Que ce soit pour les deux cas présentés ci-dessus ou pour les autres directions opérationnelles du SIAAP, le préparateur est garant de la préparation des interventions de maintenance. Il veille à ce que toutes les conditions identifiées comme nécessaires à la bonne tenue des opérations soient réunies. Lorsque ce point est vérifié, l'opération est dite préparée et peut ensuite être planifiée.

L'étape de « préparation » identifiée dans notre méthodologie a permis au SIAAP de déterminer une liste de conditions communes pour caractériser les interventions dites préparées. A partir de là, chaque direction opérationnelle a pu définir les objectifs du préparateur ainsi que son périmètre d'intervention. Le préparateur porte pour le SIAAP un des cycles naturels d'amélioration continue de la maintenance (Mikler, 2015) *permettant de capitaliser le retour d'expérience des techniciens à la suite des interventions. La mise en place de ce cycle facilite d'une part, la remontée d'informations et améliore d'autre part, la qualité des données renseignées dans l'outil de GMAO du SIAAP. Cette étape prime pour la suite de la méthodologie puisqu'en améliorant de manière continue les informations identifiées comme nécessaires à la bonne tenue des opérations, nous pourrons estimer plus précisément les temps d'interventions ; donnée fondamentale pour planifier les opérations de maintenance.*

Synthèse de la deuxième phase de la méthodologie

Cette phase de construction des outils d'optimisation de la maintenance est le prolongement direct des analyses réalisées précédemment. D'un côté, les étapes d'analyse de criticité, de maintenance conditionnelle puis, de reprise des plans de maintenance ont permis de répondre aux besoins d'amélioration de l'efficacité de la maintenance ; de l'autre, l'étape de préparation a contribué à améliorer l'efficience de la maintenance. Dans l'ensemble, les employés du SIAAP se sont bien appropriés les outils. Ce bon niveau d'acceptabilité a permis de les déployer sur la totalité des directions opérationnelles dans un temps relativement court. Cependant, le faible niveau de qualité des informations présentes dans l'outil de GMAO du SIAAP a ralenti ce déploiement et, a nécessité un effort supplémentaire – toujours en cours – pour actualiser les informations contenues dans les plans de maintenance. Ce constat renforce l'intérêt de définir en amont les données (et la manière de les collecter puis de les stocker) utiles à la bonne gestion des activités de maintenance. En ce sens, l'étape de reprise des plans de maintenance dans un premier temps puis, la mise en place de la préparation dans un second temps, offrent de réelles solutions pour surmonter ces difficultés.

[20] Les chargés d'opérations ont la responsabilité d'accompagner les entreprises extérieures qui interviennent sur l'usine.

IV. Troisième phase : mise en œuvre et pilotage

Le déploiement de la troisième phase de notre méthodologie (rappelée en figure 72) marque un profond changement d'approche, dans la conduite des différentes étapes.

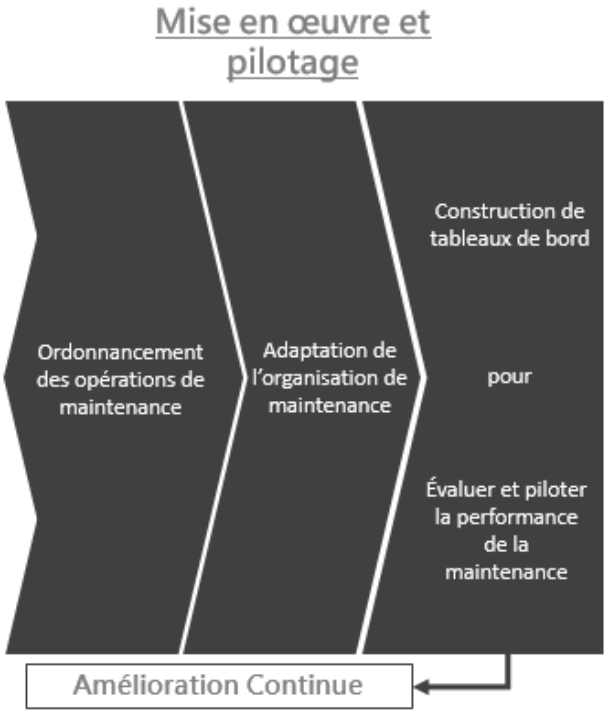


Figure 72: Rappel de la troisième phase de la méthodologie présentée au chapitre 2

Après avoir adapté de manière globale les outils d'amélioration de la maintenance, l'enjeu à présent est de les intégrer au fonctionnement local des différentes directions opérationnelles tout en tenant compte de leurs spécificités. La mise en place de la troisième phase concorde avec un changement de pilotage à l'échelle du projet *SIAAP 2030,* qui se traduit par la création de trois comités :

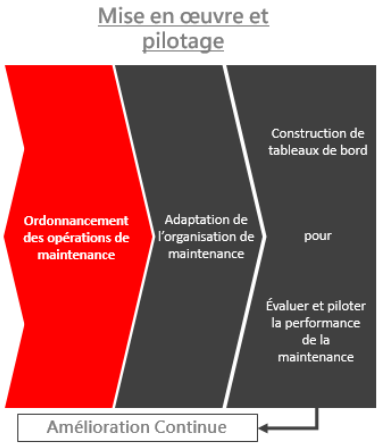
- Le Comité d'Exploitation – CE
- Le Comité Patrimoine, Prospective et Partenariats – C3P
- Le Comité Gestion des Risques – CGR
- Le Comité Ressources Humaines – CRH

Ces comités représentent le trait d'union entre un fonctionnement transversal en mode projet, et un fonctionnement hiérarchique au sein de chaque direction opérationnelle. Ils permettent une coordination entre chaque direction et chaque service du SIAAP. Ainsi, la poursuite du déploiement de notre méthodologie au sein du syndicat s'effectue en lien étroit avec le Comité d'Exploitation qui porte en particulier les objectifs en termes de maintenance – les missions et

le format de ces quatre comités sont détaillés en annexe 12. La chronologie de déploiement des étapes de la phase 3 de notre méthodologie au sein de la dynamique du projet SIAAP 2030 est présentée en annexe 5.

1. Ordonnancement des opérations de maintenance

La première étape d'analyse a mis en évidence l'utilisation ambigüe de différents termes pour désigner les activités d'ordonnancement des opérations de maintenance. Au cours du déploiement de la méthodologie, et en se basant sur les actions du projet *SIAAP 2030,* il est apparu que le terme « planification » était plus répandu et mieux ancré dans le vocabulaire quotidien des équipes de maintenance. De ce fait, nous utiliserons dans la suite du document le terme « planification » en lieu et place du terme « ordonnancement ».



Pour déployer l'étape de planification, nous nous appuyons sur le groupe de travail issu de l'action 31 – *Homogénéiser, améliorer et mieux formaliser la planification de la maintenance en s'appuyant sur la GMAO* – avec lequel nous avons déjà formalisé l'étape de préparation des opérations de maintenance. En se basant sur les recommandations de notre méthodologie, le groupe de travail a abouti à la formalisation d'un processus simplifié de planification, distinguant l'étape de « planification hebdomadaire » de l'étape d'« ajustements quotidiens du planning » (figure 73). La mise en place de la planification est pour beaucoup de directions opérationnelles du SIAAP un changement important dans le fonctionnement quotidien des équipes de maintenance.

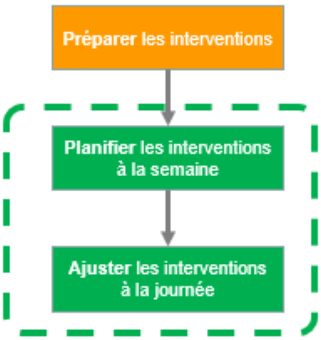


Figure 73: Processus global de planification du SIAAP

Ainsi, pour accompagner ce changement, le groupe de travail a formalisé de manière extrêmement concrète, les enjeux liés à ces deux étapes. Cette formalisation se traduit par un rappel des objectifs et des avantages, ainsi qu'une liste d'actions à effectuer pour réaliser ces deux étapes. La figure 74 présente ces trois éléments pour l'étape de planification hebdomadaire. De manière à impliquer davantage les employés de maintenance dans la mise en place de cette nouvelle étape, le rappel des objectifs, des avantages et des actions à effectuer, se fait sous forme de questions. Le livrable de l'étape de planification hebdomadaire est une liste d'opérations réalisables sur la semaine à venir, et prioritaires en vue d'atteindre les objectifs de maintenance. Parmi ces opérations, certaines seront déjà positionnées de manière précise dans le calendrier de réalisation – date et heure définies – afin de tenir compte des contraintes logistiques.

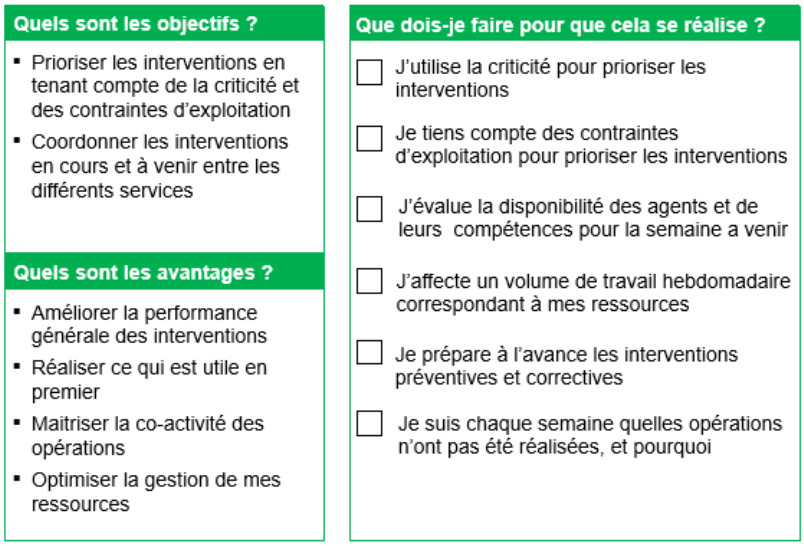


Figure 74: Formalisation pour le SIAAP des enjeux liés à l'étape de planification hebdomadaire

Les autres opérations seront réalisées sur la semaine, à la discrétion notamment des responsables d'équipes. Il s'agit de la deuxième étape de planification des opérations de maintenance: l'ajustement quotidien du planning. La figure 75 reprend les enjeux liés à cette étape.

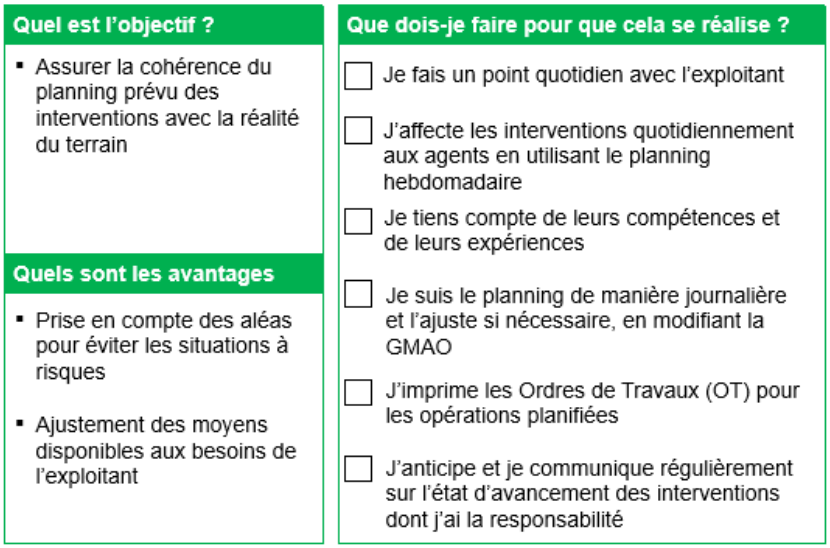


Figure 75: Formalisation pour le SIAAP des enjeux liés à l'étape d'ajustements quotidiens du planning

A ce stade du déploiement de la méthodologie, nous avons formalisé le processus de planification des opérations de maintenance, commun à l'ensemble du SIAAP. Les figures 73, 74 et 75 ont été intégrées dans la deuxième version du « manuel de maintenance du SIAAP », distribué à l'ensemble des parties prenantes de la

maintenance au début de l'années 2020. La suite de l'étape consiste à l'adapter aux spécificités locales de chaque direction opérationnelle. Cela se traduit principalement par deux actions:

- La mise en place de réunions hebdomadaires, destinées à réaliser le planning des interventions de maintenance pour la semaine à venir ;
- La spécification du processus de planification en lien avec la GMAO et les cas particuliers rencontrés sur les sites.

L'objectif de la mise en place des réunions de planification est double : identifier les parties prenantes dont la présence est essentielle, et définir le fonctionnement interne de ces réunions. L'annexe 13 regroupe les informations vérifiées et validées lors de la réunion de planification de l'usine Seine Centre. Concernant le lien avec l'outil de GMAO, le SIAAP s'est doté d'une solution logicielle – portée par la société INOTEAM – qui permet de construire le planning d'interventions de maintenance directement en se basant sur les OT renseignés en GMAO (l'interface est présentée en annexe 14). Le SIAAP a retenu cette solution, et l'a renommée « Outil de Planification du SIAAP – OPS ». Ainsi la spécification du processus de planification s'effectue en tenant compte de ce nouvel outil. Nous présentons en annexe 15 la procédure de planification définie pour la direction opérationnelle de Seine Amont.

L'étape de « planification » complète le processus de maintenance tel qu'identifié dans la méthodologie. La mise en œuvre de cette étape s'accompagne de plusieurs changements organisationnels que nous détaillerons dans la section suivante. A ce jour toutes les directions opérationnelles – exceptée SEG - ont mis en place une réunion hebdomadaire pour planifier les opérations de maintenance. En revanche, la plupart des directions utilisent leurs propres fichiers Excel au dépend de l'Outil de Planification du SIAAP. Ce dernier est utilisé uniquement par deux directions opérationnelles (Seine Amont et Seine Valenton).

2. Adaptation de l'organisation de maintenance

A ce niveau d'avancement, le SIAAP a formalisé un processus de maintenance (figure 76), commun à l'ensemble de ses directions opérationnelles et adapté aux contraintes locales. L'enjeu de cette étape est d'ajuster l'organisation pour être en capacité de faire vivre ce processus. Ces ajustements organisationnels s'opèrent essentiellement à deux niveaux. Au niveau local d'une part, où certaines compétences doivent être recrutées ainsi que des nouveaux postes crées. Puis au niveau global, où la dynamique de partage de connaissances et d'harmonisation des bonnes pratiques doit être institutionnalisée.

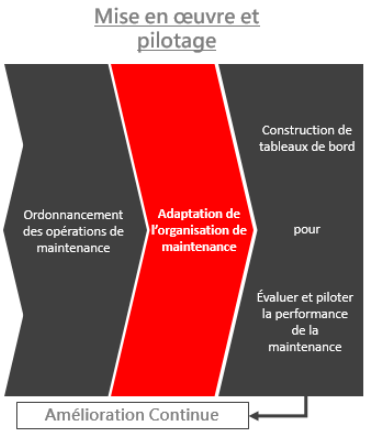




Figure 76: Processus maintenance mis en place au SIAAP

Pour les directions opérationnelles, les principaux changements concernent les étapes de préparation et de planification. La formalisation du processus maintenance a permis de définir proprement ces deux fonctions, et de clarifier leurs missions. Selon la quantité de travail que cela représente, ces fonctions ont soit fait l'objet de création de postes, ou été ajoutées au périmètre d'un poste déjà existant. Ainsi, la direction opérationnelle de Seine Amont a créé un poste de planificateur en charge d'animer les réunions de planification sur les usines de Marne Aval et Seine Morée. Seine Centre, où la planification était déjà en place et portée par le service de méthodes de maintenance, a de son côté créé un poste de préparateur dédié au service mécanique. Un des changements organisationnels majeurs concerne l'usine de Seine Aval avec la création du service Soutien Logistique et Ingénierie de Maintenance – SLIM – pour assurer les missions de pilotage de la préparation et de planification des opérations de maintenance. Le SLIM comprend également dans son périmètre la gestion du magasin afin de faciliter les échanges lors de la préparation des opérations. A l'échelle du SIAAP, ce sont essentiellement les services méthodes qui ont été impactés par ces changements organisationnels. Les ajustements locaux, permettent d'identifier un ensemble de rôles clés sur lesquels s'appuyer pour maintenir une dynamique d'harmonisation des bonnes pratiques. Au niveau global, les personnes concernées vont alimenter les réseaux métiers maintenance mis en place à l'échelle du SIAAP dans le cadre de la troisième phase du projet *SIAAP 2030*. Ainsi dans le nouveau cadre global mis en place à l'échelle du SIAAP, nous créons cinq réseaux métiers rattachés directement au Comité d'Exploitation.

- Le réseau métier « ***Pilotage de la maintenance*** » - composé des responsables maintenance de chaque direction opérationnelle, et animé par le responsable gestion patrimoniale de la Direction Technique.

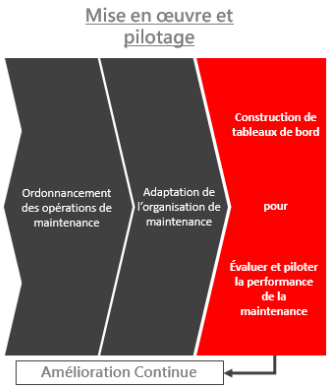
- Le réseau métier « ***Internalisation et mutualisation*** » - composé de responsables d'équipes maintenance et piloté par le responsable de l'Organisation Centrale d'Intervention – OCI[21].
- Le réseau métier « ***Préparation et planification*** » - composé des référents préparation/planification et animé par le responsable adjoint de SEC et le responsable méthodes de maintenance de SAV.
- Le réseau métier « ***Maintenance conditionnelle*** » - composé de certains responsables d'équipes maintenance et animé par le responsable maintenance adjoint de SAV.
- Le réseau métier « ***Club utilisateurs GMAO*** » - composé des référents GMAO locaux et, animé par l'administrateur central GMAO.

L'annexe 16 détaille les objectifs et les missions de chaque réseau métier.

Au terme de cette étape, le SIAAP est organisé pour mener à bien les activités de maintenance lui permettant d'atteindre ses objectifs. Les postes et les compétences clés pour y parvenir ont été identifiés et réunies. La mise en place des réseaux métiers « Pilotage de la maintenance » et « Club utilisateurs GMAO » offre un cadre pour d'une part continuer à homogénéiser les bonnes pratiques de maintenance et accompagner leur mise en œuvre, et d'autre part, garantir une qualité d'information nécessaire et suffisante au bon fonctionnement de la maintenance.

3. Construction de tableaux de bord pour évaluer et piloter la performance de la maintenance

Cette étape clôt la phase de mise en œuvre de la méthodologie. Elle consiste à définir et implanter les indicateurs nécessaires, pour évaluer et piloter les activités de maintenance. A ces fins, notre méthodologie propose quatre types d'indicateur (figure 48).



- ***Les indicateurs de résultats*** – ont été calculés lors de l'étape d'analyse macroscopique de la maintenance et de la gestion patrimoniale ;
- ***Les indicateurs concernant la qualité des données*** – ont été définis lors de l'étape d'analyse de la qualité des données (tableau 17 p.135) ;
- ***Les indicateurs d'avancement de projet*** – ont été mis en place pour suivre l'avancement des outils d'optimisation de la maintenance proposés dans la deuxième phase de la méthodologie.

[21] L'OCI est le résultat organisationnel des actions 35 et 36. Il offre au SIAAP une organisation adaptée pour internaliser des activités de maintenance jusque-là sous-traitées.

- ***Les indicateurs du processus maintenance*** – qu'il reste à définir et mettre en place.

L'enjeu de cette étape concerne principalement les ***indicateurs du processus maintenance***. Nous l'avons constaté lors de la phase d'analyse, certaines directions opérationnelles suivent déjà des indicateurs de performance de la maintenance. Avec cette étape, l'objectif pour le SIAAP est de définir des indicateurs communs à l'ensemble de ses directions opérationnelles. Pour y parvenir, nous nous sommes appuyés sur le groupe de travail ayant défini les indicateurs liés à la qualité des données, et le nouveau réseau métier « *Pilotage de la* maintenance ». La première difficulté rencontrée concerne l'exhaustivité des indicateurs présents dans la littérature. Pour canaliser les propositions débordantes des participants au groupe de travail, et s'assurer qu'elles répondent bien au besoin, nous avons admis la règle suivante : chaque indicateur présenté doit nous aider à répondre à une question. Cela a permis de regrouper plusieurs propositions est de retenir les indicateurs les plus adaptés au contexte du SIAAP. Au total, nous retenons huit indicateurs (tableau 18).

#	Questions posées	Indicateurs associés
1.	Est-ce que le réglementaire est bien effectué?	Evolution mensuelle du taux d'interventions réglementaires clôturées
2.	Est-ce que ma maintenance préventive est bien définie?	Ratio : $Nombre\ d'OT préventifs\ réalisés / Nombre\ d'OT correctifs\ réalisés$
3.	Est-ce que ma maintenance préventive est bien définie?	Ratio : $Heures\ d'OT préventifs\ réalisés / Heures\ d'OT correctifs\ réalisés$
4.	Est-ce que je tiens compte de la criticité pour prioriser mes interventions correctives?	Nombre d'OT correctifs clôturés au-delà de la date de fin souhaitée
5.	Est-ce que mes plans de maintenance sont réalisables?	Nombre d'OT annulés chaque mois
6.	Est-ce que la préparation est bien intégrée dans l'activité de maintenance?	$\frac{Nombre\ d'OT\ réalisés\ sur\ la\ semaine\ qui\ ont\ été\ préparés}{Nombre\ d'OT réalisés\ sur\ la\ semaine}$
7.	Est-ce que mes équipes tiennent compte de la planification?	$\frac{Nombre\ d'OT planifiés\ et\ réalisés\ sur\ la\ semaine}{Nombre\ d'OT planifiés\ sur\ la\ semaine}$
8.	Est-ce que la planification est bien intégrée dans l'activité de maintenance?	$\frac{Nombre\ d'OT planifiés\ et\ réalisés\ sur\ la\ semaine}{Nombre\ d'OT réalisés\ sur\ la\ semaine}$

Tableau 18: Liste des indicateurs de pilotage de la maintenance mis en place au SIAAP

La seconde difficulté concerne la faisabilité des indicateurs retenus. Pour produire de tels indicateurs, le SIAAP s'appuie sur son outil de GMAO. A ce stade, nous définissons de quelle manière obtenir via cet outil les données nécessaires à la construction des indicateurs. Cela consiste à définir ensemble le périmètre à considérer – c'est-à-dire les filtres de données – pour

obtenir chaque information. Ainsi, pour chaque indicateur, nous précisons le périmètre associé. La figure 77 illustre pour l'indicateur I, la manière dont sont diffusés les indicateurs.

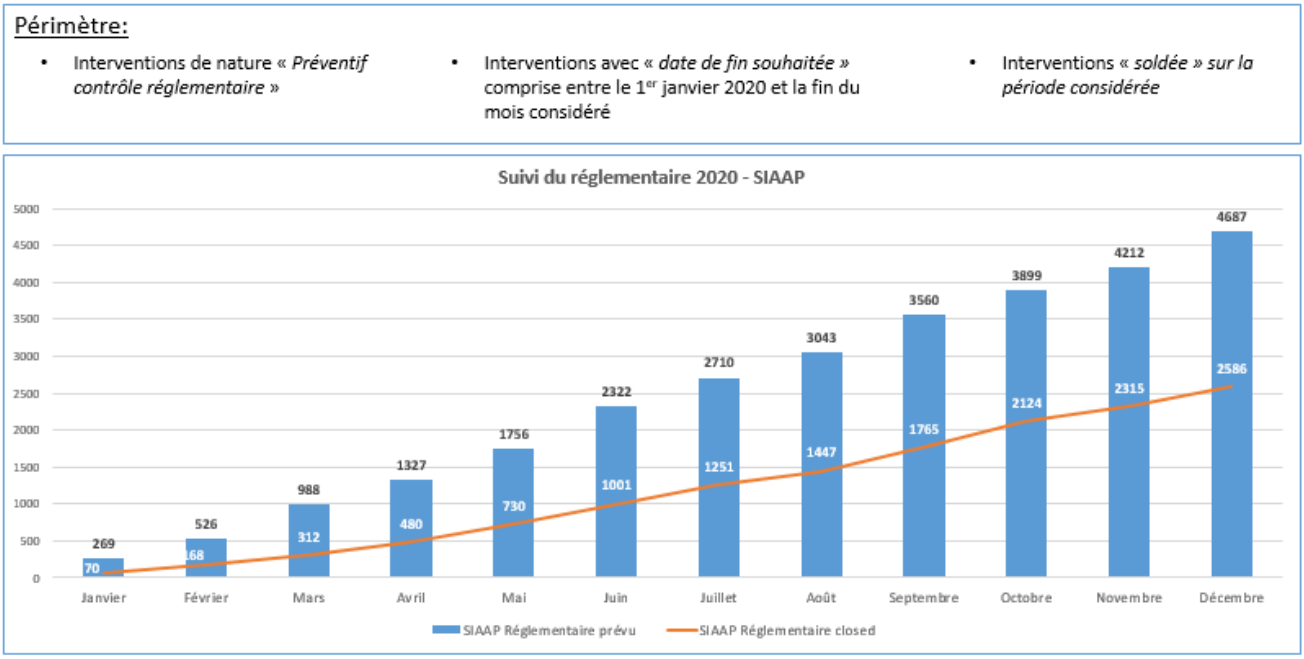


Figure 77: Indicateur de pilotage de la maintenance n° I. et son périmètre associé

L'ensemble des huit indicateurs et leur périmètre respectif sont présents en annexe 17. De même, pour faciliter la compréhension de ces indicateurs, l'annexe 18 détaille les différents « états » d'un Ordre de Travail dans le système de GMAO du SIAAP.

A ce jour les indicateurs liés à la qualité des données sont produits et diffusés mensuellement aux différents responsables maintenance, et méthodes de maintenance du SIAAP. Les indicateurs de pilotage de la maintenance sont également produits chaque mois, et analysés chaque trimestre au sein du réseau métier « *Pilotage de la maintenance* ». Les indicateurs d'avancement de projet sont quant à eux suivis par le service gestion patrimoniale de la direction technique, mais ne font pas l'objet de communication globale. Enfin, le Comité d'Exploitation – CE – suit de manière trimestrielle les trois indicateurs suivants :

- Indicateur I - Evolution mensuelle du taux d'interventions réglementaires clôturées ;
- Indicateur III - Ratio : $Heures\ d'OT préventifs\ réalisés / Heures\ d'OT correctifs\ réalisés$;
- Indicateur 3 - $\frac{Nombre\ d'interventions\ \text{"soldée" ou "terminée"}\ avec\ un\ temps\ d'occupation\ renseigné\ (\neq 0\ ou\ NULL)}{Interventions\ \text{"soldée" ou "terminée"}}$

Au terme de cette étape, le SIAAP dispose d'un ensemble d'indicateurs adaptés à ses besoins lui permettant de piloter ses activités de maintenance. Ce véritable tableau de bord comprend des indicateurs liés à la qualité des informations présentes dans le système de GMAO, et des indicateurs propres au processus de maintenance. Trois d'entre eux sont suivis par le comité d'exploitation, signe de l'importance qu'accorde le SIAAP à la maintenance et à la qualité des données présentes dans ses systèmes d'information. Afin de continuer à progresser, le SIAAP doit encore se fixer des cibles à atteindre pour chaque indicateur retenu. Dans une optique

d'amélioration continue, les indicateurs de résultats devront également être mis en place et suivis régulièrement.

Synthèse de la troisième phase de la méthodologie

Le déploiement de la dernière phase de notre méthodologie concrétise l'apport des outils d'optimisation de la maintenance en les intégrant – via l'étape de planification – au processus global de la gestion des activités de maintenance du SIAAP. A partir de ce processus commun à l'ensemble du syndicat, chaque direction opérationnelle a adapté son organisation pour être en capacité d'effectuer efficacement chaque étape. A l'échelle du SIAAP, grâce aux économies de main d'œuvre engendrées – notamment par les analyses de criticité - une Organisation Centrale d'Intervention a été créée pour internaliser de manière optimale certaines activités de maintenance. En s'appuyant sur la nouvelle organisation de pilotage du projet d'entreprise, nous avons mis en place des indicateurs de performance de la maintenance, communs à l'ensemble du SIAAP.

V. Synthèse des résultats et discussion

A travers cette cinquième et dernière partie du chapitre trois, nous présentons les résultats obtenus lors du déploiement de notre méthodologie, dans le contexte industriel du SIAAP. Nous distinguons d'une part le niveau de déploiement de la méthodologie, c'est-à-dire dans quelles mesures nous avons réussi à appliquer notre méthodologie dans un contexte industriel donné ; et d'autre part, nous présentons l'état du fonctionnement de la maintenance une fois notre méthodologie appliquée, autrement dit le résultat obtenu à l'issue du déploiement de la méthodologie.

1. Mise en œuvre de la méthodologie

Le déploiement de la méthodologie, tel que présenté dans les parties précédentes, a été effectué entre janvier 2018 et mars 2021, dans le cadre du plan stratégique *SIAAP 2030*. Le manque de données fiables dans les systèmes d'information du SIAAP a été un frein pour le déploiement. Il constitue également une difficulté pour mesurer avec précision le degré d'application de la méthodologie et les résultats apportés. Les résultats chiffrés, présentés dans cette section s'appuient sur les systèmes d'informations financiers – logiciel Coriolis – et de GMAO – logiciel Carl Source – du SIAAP.

1.1.Première phase : analyses de la fonction maintenance

La première étape d'analyse s'est appuyée sur une partie du travail effectué par le SIAAP, en amont du projet de thèse. Nous avons ainsi mené l'analyse de la stratégie de maintenance en abordant les trois thèmes proposés par la méthodologie (fonction maintenance ; management de la maintenance ; gestion patrimoniale). Ces résultats, combinés aux entretiens

effectués avec les responsables maintenance, nous ont permis d'identifier les principaux ordres de grandeurs concernant la fonction maintenance du SIAAP (tableau 14 page 127), et de caractériser son fonctionnement (figure 56 page 125). Les coûts unitaires de maintenance ont été comparés avec ceux d'autres usines du secteur d'assainissement (figure 55 page 123), et le fonctionnement global de la maintenance a pu être comparé aux résultats proposés par (Wireman, 2015). Dans l'ensemble, nous avons pu appliquer cette première étape conformément à ce que nous proposions.

Concernant la deuxième étape, nous avons rencontré plus de difficultés. Nous avons analysé la répartition des ressources maintenance au moyen de classements d'équipements par ordre décroissant selon plusieurs critères (figure 57). Cependant le faible niveau de qualité des informations présentes dans la GMAO limite la portée de ces résultats. En parallèle nous avons réussi à estimer le temps moyen passé « au pied de la machine » par les techniciens de maintenance (32 %). Toutefois, pour les raisons présentées lors de la partie II, nous n'avons pas pu appliquer la méthode proposée par (Palmer, 2013). Uniquement pour les directions opérationnelles de SEC, SAM et DSAR, nous avons pu suivre sur plusieurs journées, différentes équipes d'intervention de maintenance. De ce fait, le chiffre obtenu par cette analyse est à relativiser. Contrairement à l'étape précédente, nous avons appliqué que partiellement cette deuxième étape sur l'ensemble du syndicat.

Enfin, la dernière étape de cette première phase a pu être appliquée à l'ensemble du SIAAP. Les outils de gestions des données étant déjà implémenté, nous nous sommes concentrés à définir des règles structurantes pour la remontée d'informations, et valider un vocabulaire maintenance commun à l'ensemble du SIAAP. Cette étape a abouti à la définition de 10 règles communes d'utilisation de l'outil GMAO, et la mise en place de dix indicateurs (tableau 17).

Dans le cadre du projet SIAAP 2030, la première phase de notre méthodologie a été déployée sur l'ensemble du SIAAP entre janvier 2018 et janvier 2019. Globalement, les étapes 1 et 3 ont été appliquées conformément à ce qui a été présenté au cours du chapitre deux. En revanche, les analyses macroscopiques n'ont pu être appliquées que de manière partielle.

1.2.Deuxième phase : outils d'optimisation de la maintenance

A travers cette deuxième phase, le SIAAP s'est doté de nouveaux outils pour optimiser la gestion de ses activités de maintenance. Les différentes parties prenantes de la maintenance se sont appropriées ces nouveaux outils et les ont adaptés à leurs enjeux.

Les études de fiabilité se sont concentrées sur l'analyse de la criticité des équipements. A l'échelle du SIAAP, cet effort considérable s'est étalé sur l'ensemble des années 2018 et 2019

et a permis d'analyser plus de 100 000 équipements. La tableau 19 détaille par direction opérationnelle le nombre d'équipements passés en revue avec la criticité. A ce jour, seule la Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux n'a pas terminée de déployer l'analyse de criticité. Ces analyses permettent de discriminer selon trois niveau de criticité les équipements. Nous obtenons une réparation « équipements critiques » / « équipements non critiques » de 25% / 75% (figure 78), ce qui valide la pertinence des critères retenus pour la méthode PIEU.

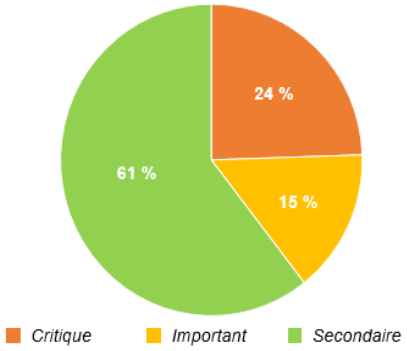


Figure 78: Répartition de la criticité pour l'ensemble des équipements du SIAAP

	Seine Grésillons	Seine Aval	Seine Centre	Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux	Seine Amont	SIAAP
Nombre d'équipement avec une criticité renseignée en GMAO	11 850	39 478	25 621	11 268	17 193	**105 410**
Nombre total d'équipements répertoriés en GMAO	11 861	42 804	25 621	19 415	17 904	**117 605**
Exprimé en pourcentage	99,9%	92,2%	100,0%	58,0%	96,0%	**89,6%**

Tableau 19: Les équipements répertoriés en GMAO avec une criticité « PIEU » renseignée – données issues de la GMAO du SIAAP

A ce jour, le développement de la maintenance conditionnelle via l'utilisation des techniques d'analyse vibratoire ne concerne que quelques directions opérationnelles. Seuls les agents des usines de SEC et SAV ont bénéficié d'une formation, et l'usine de Seine Morée a quant à elle fait appel à une entreprise extérieure pour réaliser les analyses vibratoires. Le tableau 20 montre la belle progression du nombre de gammes de maintenance conditionnelle à l'échelle du SIAAP, et souligne l'hétérogénéité du niveau d'implémentation par direction opérationnelle.

	Seine Grésillons	Seine Aval	Seine Centre	Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux	Seine Amont	SIAAP
Nombre de gamme de maintenance conditionnelle renseignée en GMAO en octobre 2018	12	25	1	4	4	**46**

Nombre de gamme de maintenance conditionnelle renseignée en GMAO en mars 2021	12	92	9	45	4	**162**
Progression 2021 vis-à-vis de 2018	0	67	8	41	0	**116**

Tableau 20: Nombre de gamme de maintenance conditionnelle renseignée en GMAO – données issues de la GMAO du SIAAP

Compte tenu du périmètre initialement identifié – 8 000 pompes – le niveau d'implémentation de la maintenance conditionnelle reste relativement faible. Pour autant, ces actions ont permis de générer *984 k€* d'économie entre 2018 et 2020. Cela montre tout le potentiel de la mise en place de la maintenance conditionnelle, et valide l'intérêt d'utiliser de telles pratiques dans une démarche d'accompagnement au changement pour générer des victoires rapides. L'enjeu à présent pour le SIAAP est d'élargir le périmètre de la maintenance conditionnelle et de pérenniser cette pratique.

En raison du faible niveau d'information présent en GMAO, et notamment dans les gammes de maintenance, nous n'avons pas pu mesurer les économies générées par le fait d'adapter la fréquence des plans de maintenance à partir de la criticité des équipements. L'étape de reprise des plans de maintenance fût l'occasion pour le SIAAP de combler cette lacune. De ce fait, les indicateurs de remplissage de la GMAO, notamment les indicateurs V, VI et VII définis à l'issue de la première phase de la méthodologie (tableau 17), permettent de suivre le niveau d'avancement de cette étape. Le tableau 21, construit à partir de l'indicateur V montre l'augmentation du nombre de gamme avec un temps d'occupation estimatif renseigné, signe de l'amélioration de la qualité des informations. Les indicateurs VI et VII présents en annexe 19 confortent ce constat. Ces trois indicateurs traduisent la présence d'informations en GMAO et reflètent la bonne dynamique de reprise des plans de maintenance au SIAAP. En revanche ils ne garantissent pas l'exactitude des données présentes. Dans une démarche d'amélioration continue, à partir des retours d'expérience des équipes de maintenance l'exactitude de ces informations sera amenée à augmenter.

		Seine Grésillons	**Seine Aval**	**Seine Centre**	**Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux**	**Seine Amont**	**SIAAP**
Janvier 2018	Nombre de gamme de maintenance avec un temps estimatif renseigné	1104	3 410	672	1 305	640	**7 131**
	Nombre total de gamme de maintenance	1164	3 759	687	1 333	940	**7 883**
	Exprimé en pourcentage	95 %	91 %	98 %	98 %	68 %	**90 %**
Mars 2021	Nombre de gamme de maintenance avec un temps estimatif renseigné	891	3 367	615	1 485	955	**7 313**

Nombre total de gamme de maintenance	971	3 497	713	1 510	1035	**7 726**
Exprimé en pourcentage	92 %	96 %	86 %	98 %	92 %	**95%**

Tableau 21: Suivi des gammes de maintenance avec un temps estimatif d'intervention renseigné - données issues de la GMAO du SIAAP

Améliorer le retour d'information est un des objectifs de l'étape de préparation telle que formalisée dans notre méthodologie. L'ensemble des directions opérationnelles du SIAAP a commencé à mettre en place cette étape au cours du deuxième semestre 2019. La figure ci-dessous reprend l'indicateur III sur la période de février 2019 à mars 2020.

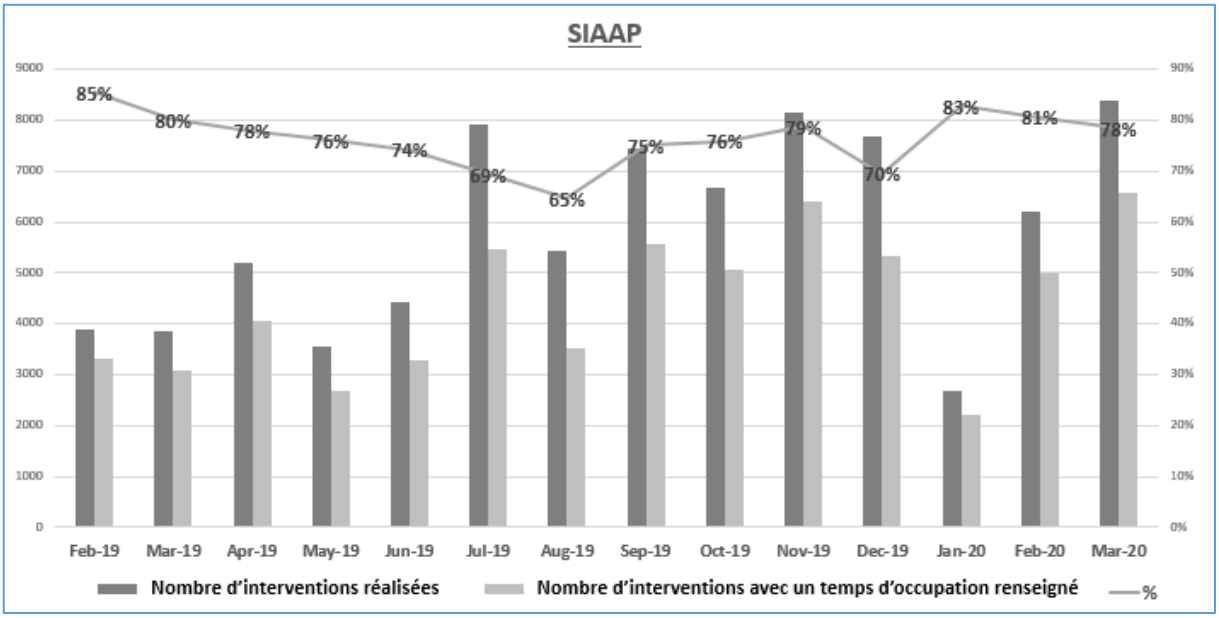


Figure 79: Evolution mensuelle à l'échelle du SIAAP du nombre d'interventions réalisées ayant un temps d'occupation renseigné en GMAO (indicateur III) – données issues de la GMAO du SIAAP

Nous observons à partir du deuxième semestre 2019 une nette augmentation du nombre d'interventions réalisées mensuellement qui perdure sur le reste de la période considérée. Ceci traduit les effets positifs suite à la mise en place de la préparation, qui d'une part améliore le retour d'informations (plus d'opérations sont renseignées et suivies en GMAO), et d'autre part augmente le nombre d'interventions réalisées (ces dernières sont mieux préparées, les employés perdent ainsi moins de temps, et peuvent réaliser davantage d'opérations). L'indicateur démontre la bonne dynamique enclenchée au SIAAP par la mise en place de l'étape de préparation. A ce stade, l'apport économique d'une telle mesure est difficilement quantifiable compte tenu de la qualité des données présentes dans les systèmes d'informations de l'entreprise. En revanche il se mesure immédiatement par l'augmentation du retour d'informations, nécessaire pour entretenir une dynamique d'amélioration continue.

Globalement les différents outils d'optimisation de la maintenance proposés dans notre méthodologie ont pu être appliqués à l'ensemble du SIAAP. Les résultats obtenus malgré un déploiement partiel pour certains, valident la pertinence de ces outils et révèlent tout le potentiel d'amélioration de la maintenance au SIAAP.

1.3.Troisième phase : mise en œuvre et pilotage

La troisième phase de la méthodologie a permis au SIAAP d'intégrer les différents outils d'optimisation dans la gestion quotidienne de ses activités de maintenance.

L'étape de planification a abouti pour toutes les directions opérationnelles à la création d'un, ou plusieurs postes de « planificateur » garant d'animer le processus de préparation-planification et notamment les réunions dédiées à cet effet. Aujourd'hui, à l'exception de l'usine SEG, l'ensemble des directions opérationnelles tient de manière hebdomadaire une (ou plusieurs) réunions de préparation-planification. Ainsi l'ensemble des activités de maintenance au SIAAP est organisé autour du processus identification du travail, préparation du travail, ordonnancement du travail et exécution du travail. Cependant le niveau de planification globale reste encore faible, et surtout difficilement mesurable à l'échelle du SIAAP. Le tableau ci-dessous regroupe les informations obtenues via la GMAO permettant de mesurer la performance de la planification. Bien que le ratio global (*Nombre d'interventions planifiées et réalisées / Nombre d'interventions planifiées*) soit excellent (78 %), très peu de données sont remontées. A la lecture du tableau, seule la direction opérationnelle utilise pleinement le module Outil de Planification du SIAAP – OPS – pour suivre le niveau de planification de ses opérations. Le principal enjeu pour le SIAAP est de consolider cette bonne pratique en amenant les équipes de maintenance à utiliser le module OPS.

Avril 2021	Seine Grésillons	Seine Aval	Seine Centre	Direction du Système d'Assainissement et des Réseaux	Seine Amont	SIAAP
Nombre d'interventions planifiées	7	2	0	0	209	**218**
Nombre d'interventions planifiées et réalisées	5	1	0	0	163	**169**

Tableau 22: Suivi via le module OPS de la GMAO des interventions planifiées sur le mois d'avril 2021 – données issues de la GMAO du SIAAP

Au-delà de la création des postes de « préparateur », de la réorganisation de certains services maintenance au sein des directions opérationnelles et de la création des réseaux métiers maintenance, l'étape d'adaptation de l'organisation de maintenance a vu naître la création d'une Organisation Centrale d'Intervention – OCI – pour faciliter l'internalisation de prestations de maintenance jusqu'ici réalisées par des entreprises extérieures. La création de l'OCI ne fait pas

partie à proprement parlé du périmètre de notre thèse, mais a été rendu possible par les gains (en terme de main d'œuvre) issus des analyses de criticité et de la reprise des plans de maintenance. Ainsi, nous quantifions l'apport économique des analyses de criticité par le coût des prestations internalisées. Au total, le montant des prestations internalisées entre 2018 et 2020, via la création de l'OCI s'élève à 3 885 k€.

La dernière étape a abouti à la création des indicateurs de pilotage de la maintenance, définis dans le tableau 20. A ce jour, les indicateurs 1 à 5 sont produits de manière automatisée à partir de la GMAO. Les indicateurs 6 à 8 nécessitent quant à eux une meilleure utilisation du module OPS par les équipes de maintenance pour être réalisés de la même manière. Ces huit indicateurs, ainsi que les indicateurs de remplissage de la GMAO (tableau18) sont suivis régulièrement par les différents responsables maintenance à travers le réseau métier ***pilotage de la maintenance*** (annexe 16). Ils permettent ainsi le bon pilotage des activités de maintenance.

Les trois dernières étapes ont été appliquées au SIAAP, entraînant ainsi plusieurs changements et ajustements organisationnels. Elles permettent au management de la maintenance de disposer des outils nécessaires au pilotage. L'apport de ces étapes est avant tout une évolution de l'organisation du SIAAP qui concrétise les efforts consentis par la mise en place des analyses de criticité. En optant pour internaliser des prestations extérieures, le SIAAP a pu économiser un peu moins de quatre millions d'euros sur trois ans.

Dans l'ensemble les étapes de la méthodologie ont pu être appliquées au SIAAP. Seules les analyses macroscopiques n'ont pu aboutir en raison du faible niveau de qualité des informations présentes en GMAO, et de certaines réticences quant à l'analyse des temps d'intervention. Par

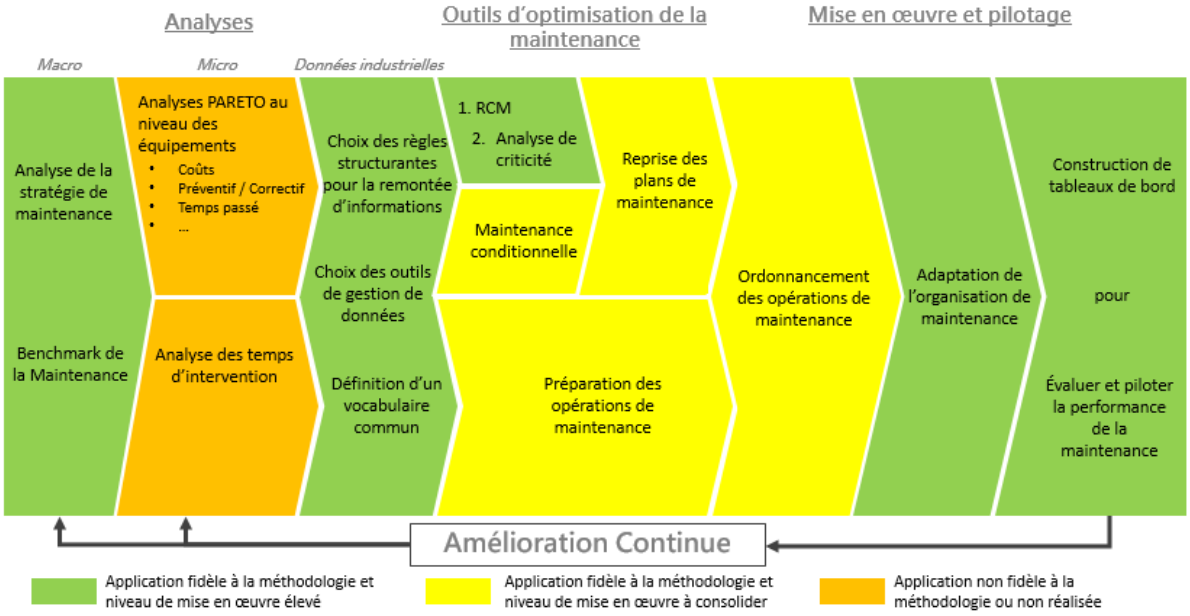


Figure 80: Niveau de mise en œuvre global au SIAAP de la méthodologie

ailleurs, d'autres étapes ont été mise en œuvre mais doivent être consolidées et déployées à l'ensemble des usines. La figure 80 synthétise le niveau de mise en œuvre global de notre méthodologie au sein du SIAAP.

Le tableau ci-dessous détaille les économies engendrées entre 2018 et 2020 par les actions du projet *SIAAP 2030* en lien avec nos travaux de thèse. Ces économies – présentées tout au long de cette section – ont été consolidées par le service de la stratégie financière, et présentées en novembre 2020 au conseil d'administration du SIAAP.

# Actions SIAAP 2030	**Economies générées (k€)**		
	2018	**2019**	**2020**
28 – Définir et mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de la criticité des équipements	0	80	80
30 – Améliorer et développer la maintenance conditionnelle	257	417	310
35 – Mettre en place un « atelier central »	0	0	86
36 – Évaluer le potentiel d'internalisation	874	1 328	1 603
Total	**1 131**	**1 825**	**2 079**

Tableau 23: Economies engendrées par les actions SIAAP 2030 et présentées au conseil d'administration du SIAAP en novembre 2020

Les résultats obtenus suite à l'expérimentation de notre méthodologie au sein du SIAAP montrent un niveau important de mise en œuvre à l'issue des trois ans. Cela traduit une bonne acceptabilité des outils proposés de la part des équipes du SIAAP et valide le caractère « applicable à un contexte industriel » de notre méthodologie. L'application de notre méthodologie a également permis de générer un peu plus de cinq millions d'économies de maintenance (tableau 24) sur les trois années considérées et contribue ainsi à améliorer la performance économique de la maintenance. Enfin, l'attente particulière portée à la qualité des données, l'organisation des activités de maintenance autour du processus définit par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) et la mise en place d'indicateurs de pilotage de la maintenance offrent au management les conditions nécessaires pour disposer des informations pertinentes et de qualité sur lesquelles s'appuyer pour prendre les meilleures décisions.

Ces premiers résultats valident en partie la pertinence de notre méthodologie, et de ce fait, notre hypothèse.

2. Evolution de la fonction maintenance

Le déploiement de notre méthodologie au sein du SIAAP a engendré une évolution importante des pratiques de maintenance et de leur gestion. Un des objectifs de notre méthodologie est d'offrir au management de l'entreprise une meilleure maîtrise des activités de maintenance. Cela peut être caractérisé par le bon niveau d'implémentation de certaines « bonnes pratiques de maintenance ». L'utilisation du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) nous a permis d'identifier en 2018 le niveau d'implémentation de ces bonnes pratiques au SIAAP. Nous l'avons de nouveau appliqué en Octobre 2020. Les résultats obtenus à un intervalle de 32 mois sont présentés en figure 81.

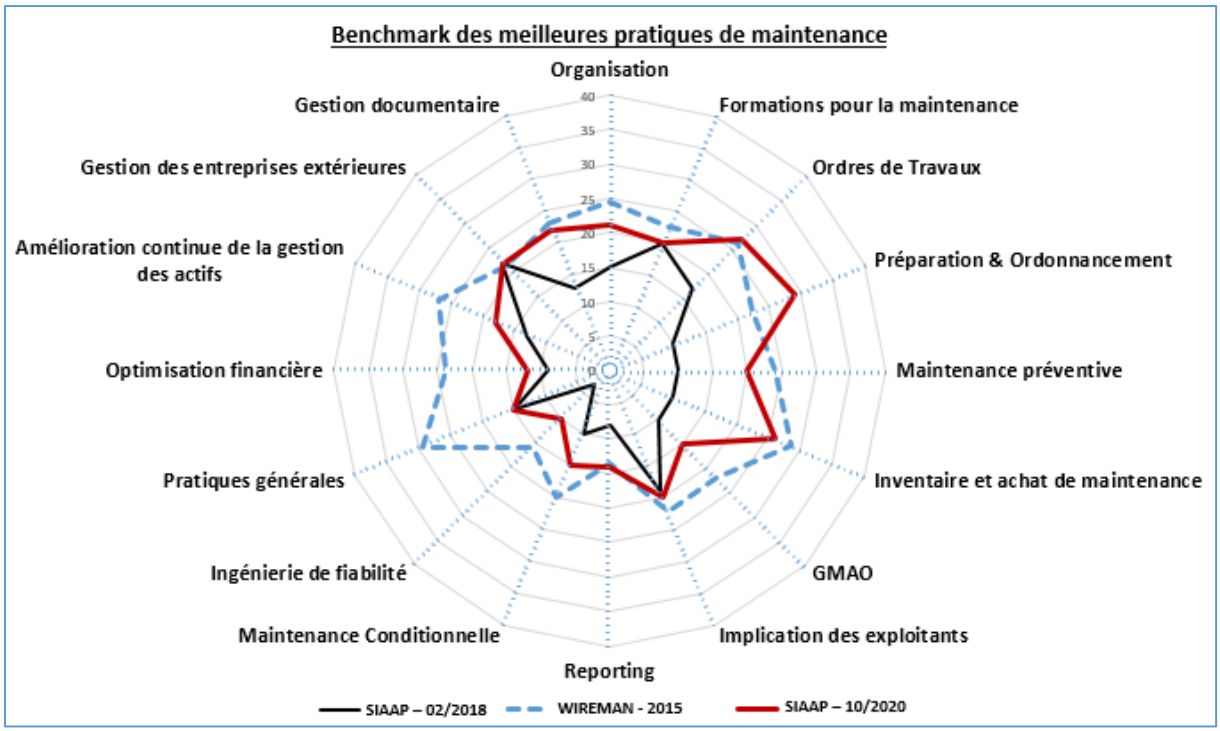


Figure 81: Evolution entre 2018 et 2020 du niveau de mise en œuvre des bonnes pratiques de maintenance à travers le SIAAP sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015)

L'élargissement de la courbe rouge (situation du SIAAP en octobre 2020) vis-à-vis de la courbe noire (situation du SIAAP en février 2018) traduit dans l'ensemble une meilleure intégration des bonnes pratiques de maintenance au SIAAP. Les évolutions les plus importantes concernent la préparation et l'ordonnancement, la maintenance préventive, l'inventaire et les achats de maintenance, les ordres de travaux ainsi que la gestion documentaire. Les résultats soulignent une meilleure gestion de la maintenance préventive, élément essentiel et indispensable en vue d'améliorer la maintenance (Monchy and Vernier, 2010; Wireman, 2015). Ils confirment également la bonne dynamique au SIAAP autour des étapes de préparation et

d'ordonnancement. Cet aspect central de notre méthodologie enregistre ici la plus forte progression et entraîne avec lui d'autres aspects de la maintenance non abordés directement par notre méthodologie (ordres de travaux, inventaire et achat de maintenance, reporting). De, plus, la figure 81 souligne une légère progression concernant l'ingénierie de fiabilité, l'utilisation de l'outil GMAO et la maintenance conditionnelle. Cela traduit l'apport direct des étapes d'analyse de données, et d'amélioration de l'efficacité de la maintenance (analyse de criticité, analyse vibratoire) intégrées à notre méthodologie. Concernant la maintenance conditionnelle, la faible progression s'explique par le niveau de mise en œuvre encore insuffisant des techniques de maintenance conditionnelle sur l'ensemble du SIAAP. Pour l'ingénierie de fiabilité et l'utilisation de la GMAO, bien que les étapes associées dans notre méthodologie aient été mises en œuvre, la progression enregistrée sur la figure 81 est relativement faible. La raison principale est que ces deux aspects de la maintenance, pour être améliorés de manière significative, doivent être intégrés dans les habitudes de travail des équipes de maintenance, ce qui demande un certain temps. A ce niveau, la dynamique d'amélioration continue impulsée par la méthodologie, permettra à l'entreprise d'intensifier sa progression. L'augmentation importante du niveau d'implémentation de plusieurs bonnes pratiques de maintenance au SIAAP traduit une meilleure maîtrise des activités de maintenance. La méthodologie proposée permet ainsi au management de maîtriser la fonction maintenance. Cependant ces résultats peuvent être encore améliorés. Dans une démarche globale d'amélioration continue, nous avons interrogé (à l'aide du questionnaire proposé par (Wireman, 2015)) plusieurs utilités du secteur d'assainissement

des eaux usées et de taille comparable (en terme de volume d'eau traité quotidiennement) au SIAAP. L'annexe 20 présente les différents participants et leurs principales caractéristiques. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure ci-dessous.

La figure 82 regroupe les deux résultats du SIAAP (février 2018 et octobre 2020) et la moyenne des réponses des utilités du secteur d'assainissement des eaux usées (courbe verte). Elle met en évidence les progrès réalisés par le SIAAP sur les trois dernières années, mais aussi le chemin qui lui reste à parcourir pour se rapprocher du niveau d'implémentation moyen des bonnes pratiques de maintenance dans son secteur d'activité.

L'échantillon permettant de définir le niveau moyen d'implémentation des bonnes pratiques de maintenance dans le secteur d'assainissement reste faible (onze utilités en intégrant le SIAAP). Pour définir quelles pratiques sont représentatives du secteur considéré, il importe de considérer l'écart type des résultats obtenus (tableau 24).

Une représentation graphique en annexe 21 positionne les bonnes pratiques de maintenance selon les axes « *moyenne* » et « *écart type* ». Les quatre bonnes pratiques de maintenance possédant l'écart type le plus faible et la meilleure moyenne sont :

- La gestion des entreprises extérieures ;
- La préparation et l'ordonnancement des opérations de maintenance ;
- La gestion des Ordres de Travaux de maintenance ;

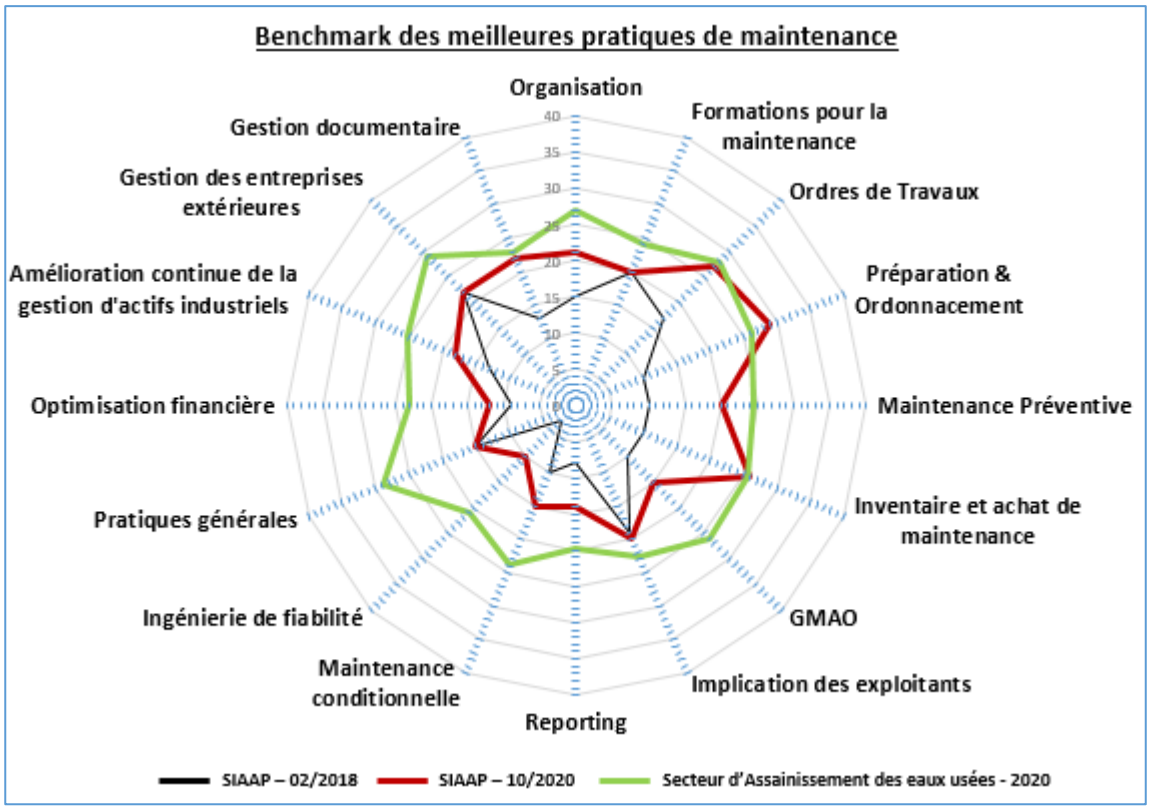


Figure 82: Benchmark des bonnes pratiques de maintenance implémentée dans le secteur d'assainissement des eaux usées sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) - 2020

- L'organisation de la maintenance.

Bonnes pratiques de maintenance	Ecart type	Moyenne
Organisation de la maintenance	4,94	26,8
Formations pour la maintenance	4,49	24,2
Ordres de Travaux de maintenance	5,48	28
Préparation et Ordonnancement	3,85	26,2
Maintenance préventive	5,13	24,6
Inventaire et achat de maintenance	10,10	25,7
Utilisation de la GMAO	8,67	26,1
Implication des équipes de production	6,04	22,6
Reporting des activités de maintenance	5,89	19,7
Maintenance conditionnelle	8,70	23,8
Ingénierie de fiabilité	12,50	20,8
Pratiques générales de maintenance	6,30	28,9
Optimisation financière	5,72	23,1
Amélioration continue de la gestion des actifs industriels	5,41	25,2
Gestion des entreprises extérieures	3,07	28,9
Gestion documentaire	6,00	29,8
Médiane	**5.81**	**25.5**

Tableau 24: Moyenne et écart type obtenu à l'issu du benchmark pour chaque bonne pratique de maintenance

Il s'agit des pratiques (selon les résultats obtenus) les plus représentatives du secteur d'assainissement des eaux usées, et qui sont le mieux implémentées. De ce fait, un bon niveau d'implémentation de ces pratiques permet de maîtriser la fonction maintenance dans le secteur d'activité considéré. Par rapport à ces quatre pratiques, le SIAAP possède un niveau d'implémentation proche ou égal du niveau moyen du secteur d'assainissement des eaux usées. De ce point de vue, il dispose donc d'une maîtrise suffisante de la fonction maintenance pour faire face aux enjeux de son domaine d'activité. Une analyse plus globale de ces résultats montre notamment l'écart important entre le SIAAP et la moyenne du secteur concernant l'utilisation de la GMAO, ce qui permet d'orienter les efforts futurs d'amélioration.

3. Discussions

Nos travaux de thèse ont été initiés pour apporter une réponse à la question industrielle rencontrée par le SIAAP et que nous avons formalisée ainsi : ***Comment assurer la disponibilité des infrastructures de traitement et de transport des eaux usées au meilleur coût ?*** L'analyse du contexte et des enjeux de l'entreprise a mis en évidence la part importante des coûts de

maintenance dans le budget d'exploitation de ses usines, ainsi que l'impact considérable des activités de maintenance sur la disponibilité des infrastructures. Ces premières observations ont orienté notre étude de l'état de l'art, dont les principaux constats ont permis d'identifier notre problématique de recherche : ***Comment faire évoluer les entreprises d'envergure pour améliorer leur fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques ?*** Pour répondre à cette question, nous avons décidé d'aborder la fonction maintenance dans son ensemble, en nous adressant avant tout au management. Nous avons ainsi proposé l'hypothèse suivante : ***Formalisation d'un modèle managérial global de la fonction maintenance.*** Notre hypothèse porte sur la nécessité de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite être en capacité de l'améliorer de manière pérenne. Cela implique pour le management de disposer des outils (techniques, méthodiques et organisationnels) adaptés à son environnement, lui permettant de susciter la remontée des bonnes informations, et de prendre une décision sur cette base. Pour y parvenir, les entreprises doivent évoluer et intégrer dans le fonctionnement quotidien de leurs activités de maintenance les outils pertinents. C'est pourquoi nous avons proposé une méthodologie globale d'évolution de la fonction maintenance afin d'accompagner les entreprises face à ces changements. La méthodologie présentée considère la fonction maintenance dans sa globalité et intègre en particulier les dimensions économiques, managériales et techniques de la maintenance. Cela permet de construire une méthodologie applicable dans un contexte industriel, contribuant à améliorer la performance économique de la maintenance, tout en permettant au management de maîtriser et piloter ses activités de maintenance. Pour vérifier ces différents aspects, et valider notre hypothèse, nous avons appliqué notre méthodologie dans le contexte industriel du SIAAP. Les résultats obtenus à l'issue de ces trois années montrent un niveau d'application de la méthodologie au SIAAP globalement élevé (figure 80). Seules les analyses macroscopiques, basées sur des données industrielles n'ont pu être réalisées correctement en raison de la faible qualité des informations présentes dans les différents systèmes d'informations du SIAAP (en particulier celui de GMAO). Cela montre les grandes difficultés que nous pouvons rencontrer lorsque nous cherchons à appliquer dans un contexte industriel des outils ou des méthodes basées sur de multiples données. D'autres étapes (comme la reprise des plans de maintenance) ont été appliquées partiellement car nécessitent un temps de mise en œuvre plus long. A ce niveau, le fait d'organiser les activités de maintenance autour d'un processus d'amélioration continue, offre la possibilité d'intégrer progressivement et de manière pérenne ces étapes dans les activités quotidiennes de maintenance. Pour le SIAAP, le déploiement de notre méthodologie au cours des trois dernières années a permis de générer un total de 5 035 k€

d'économies (tableau 24) sans dégrader le service rendu ce qui signifie une amélioration de la performance économique de la maintenance au SIAAP. Les résultats obtenus à l'issue du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) traduisent une meilleure intégration des bonnes pratiques de maintenance au SIAAP et par conséquent une meilleure maîtrise de la gestion des activités de maintenance. Enfin, le déploiement de la méthodologie a permis d'organiser les activités de maintenance autour d'un processus commun à l'ensemble des directions opérationnelles, puis de définir et mettre en œuvre les indicateurs de performance adaptés. Le management du SIAAP est à présent en mesure de piloter ses activités de maintenance. Tous ces éléments confirment les différents aspects recherchés de notre méthodologie (applicable à un contexte industriel, améliorant la performance économique de la maintenance, et permettant de maîtriser et piloter les activités de maintenance), justifient sa pertinence, permettent ainsi de valider notre hypothèse. De par la validation de notre hypothèse, nous pouvons valider l'ensemble du schéma de construction de la méthodologie proposée, et répondre à notre problématique initiale.

Hypothèse : Formalisation d'un modèle managérial global de la fonction maintenance

Validée

Les données permettent de mesurer et de caractériser les efforts effectués, de donner du sens aux activités de maintenance réalisées, et ainsi de progresser. De ce point vue, notre méthodologie permet à la fois d'obtenir des données de maintenance plus structurées et organisées dans un système d'information (un outil GMAO), mais également des données managées à l'intérieur d'une organisation de la maintenance orientée dans une démarche d'amélioration continue. L'accumulation progressive des données de maintenance permet dans un second temps au management de prendre les décisions les plus adaptés

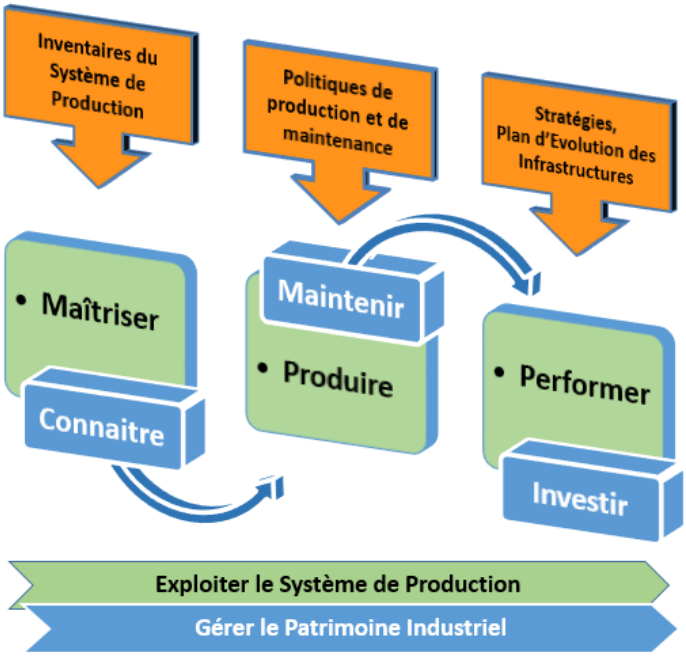


Figure 83: Apport de la maintenance pour la gestion du patrimoine industriel et de son exploitation

à leur contexte pour améliorer la fonction maintenance et de manière globale la performance de l'entreprise.

Parmi les principales décisions impactant la maintenance (figure 18), celle liée au renouvellement des équipements dépasse le périmètre de la maintenance et étend son apport à la gestion globale du patrimoine industriel. La figure 83 schématise l'apport de la maintenance dans la gestion du patrimoine industriel et dans l'exploitation du système de production. Ces macro-processus positionnent le « maintenir » comme contributeur principal à l'étape clé « produire » du macro-processus « exploiter le système de production », et également comme préalable à « l'investir », étape ultime du macro-processus « gérer le patrimoine industriel ». Dans ce contexte, les analyses de coût de cycle de vie telles que proposées par (Dhillon, 2017) représentent pour le management de véritables outils d'aide à la décision quant au choix d'investir dans le renouvellement des équipements. Ces analyses s'appuient entre autre sur les coûts d'acquisition, les coûts de défaillance, les coûts cumulés de maintenance et les coûts cumulés de fonctionnement, pour définir le coût global de possession d'un équipement et identifier ainsi sa durée de vie économique (Márquez et al., 2009). En structurant la remontée d'informations liées aux activités de maintenance, notre méthodologie permettra à terme d'appliquer ces analyses et de ce fait d'améliorer considérablement la performance économique de la maintenance. Ce point nécessite un temps plus long (que celui de nos travaux de thèse) pour pouvoir être vérifié, mais rend d'autant plus critique et important la troisième étape de notre méthodologie (analyse de la qualité des données), qui au-delà d'identifier les données nécessaires au bon management de la maintenance, doit également identifier celles contribuant aux analyses de coûts de cycle de vie.

En faisant évoluer l'organisation de la maintenance, notre méthodologie permet au management d'être en capacité de gérer les données de maintenance et de prendre des décisions sur cette base. Cette bonne gestion de la donnée permet de prendre de meilleures décision et ainsi d'améliorer la maintenance. Il s'agit également d'un premier pas vers la maturité digitale (Caiado et al., 2020) et surtout d'un prérequis pour avancer vers de la maintenance 4.0 (Kasper and Miklovic, 2017). Si la maîtrise des données issues des systèmes d'informations de GMAO est nécessaire, elle n'est pas suffisante. L'évolution des nouvelles technologies avec notamment l'internet des objets, donne accès à d'autres données et par conséquent d'autres informations permettant d'améliorer la fonction maintenance. Nous l'avons observé avec la mise en place de la maintenance conditionnelle (analyses vibratoires) qui a permis de suivre certains paramètres de fonctionnement des équipements, de mieux les connaître et ainsi d'adapter l'effort de maintenance. Les technologies de l'industrie 4.0 permettent d'une part de se rapprocher des

équipements en collectant davantage de données et en temps réel, ce qui offre au management une meilleure compréhension instantanée de l'état de santé des équipements. D'autre part, elles facilitent pour les équipes de maintenance l'accès aux informations nécessaires à la réalisation de leurs activités. Pour bénéficier de ces apports, il est nécessaire que les organisations de la maintenance s'approprient ces nouveaux outils et méthodes de travail. Pour cela, il nous semble toujours pertinent de distinguer l'efficacité et l'efficience de la maintenance. C'est-à-dire d'identifier la juste quantité de maintenance à réaliser pour atteindre les objectifs, et de définir la bonne organisation et méthode de travail pour intervenir le plus proprement possible sans perdre de temps. En ce sens, les analyses proposées par (Karim et al., 2016) selon le niveau d'informations connues – analyses descriptives, de diagnostic, prévisionnelles et prescriptives – s'inscrivent complètement dans cette logique. Ces analyses permettent à la fois d'anticiper les pannes et d'identifier les opérations à réaliser pour éviter les pannes potentielles. Elles offrent ainsi la possibilité aux équipes de maintenance d'anticiper et de préparer leurs interventions, deux éléments essentiels pour sortir d'une dynamique réactive et contrôler véritablement les activités de maintenance. Pour y parvenir, cela suppose une meilleure maîtrise des données industrielles.

Chapitre 4

Apports, conclusion et perspectives

Chapitre 4 : Apports, conclusion et perspectives

I. Apport de nos travaux de recherche

Nos travaux de recherche ont permis de proposer une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance à destination du management, permettant de l'améliorer en prenant en compte les nouveaux apports technologiques. Elle est rappelée en figure 84.

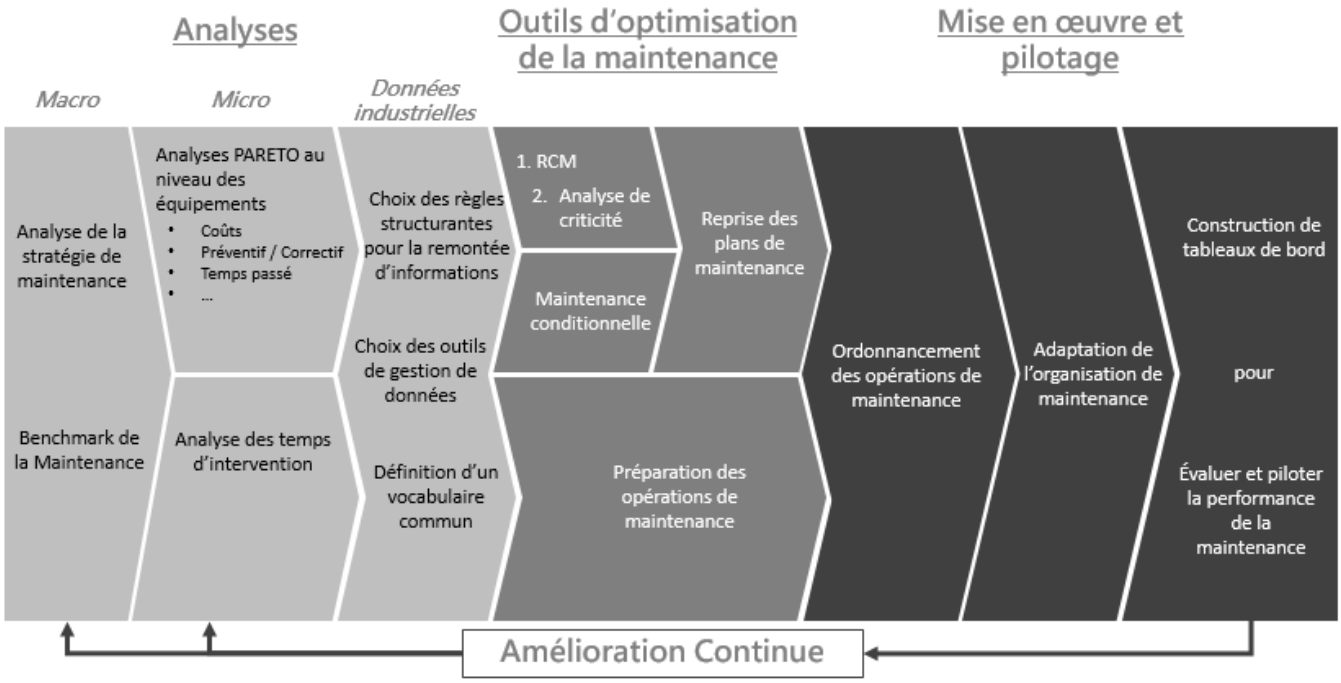


Figure 84: Rappel de la méthodologie proposée

Dans un premier temps, nous avons mis en avant l'intérêt de la maintenance et son rôle stratégique dans l'industrie, notamment pour le secteur de l'assainissement, mais également toute sa complexité. Dans un second temps, nous avons mis en lumière la volonté grandissante des industriels d'optimiser la fonction maintenance de leur entreprise, particulièrement en s'appuyant sur les nouvelles technologies de l'industrie 4.0. Enfin, nous avons soulevé les lacunes des modèles d'optimisation de la maintenance présents dans la littérature scientifique, et plus spécifiquement leurs difficultés de mise en œuvre dans un contexte industriel. Face à ces constats, la notion de management de la maintenance est apparue comme un élément essentiel d'amélioration de la maintenance, permettant d'appréhender à la fois les dimensions techniques, humaines et économiques de la maintenance. Nous avons ainsi proposé une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance tenant compte de ces différents aspects, et permettant de formaliser et mettre en place un modèle globale de management de la maintenance. Notre méthodologie s'adresse essentiellement au management des entreprises

industrielles et guide chaque responsable cherchant à améliorer sa fonction maintenance. Elle s'appuie entre autre sur les principales recommandations des modèles d'accompagnement au changement et se compose ainsi de trois grandes phases. La première phase d'analyses qui permet de comprendre les objectifs de l'entreprise et d'identifier comment ils se traduisent pour les activités quotidiennes de maintenance, en analysant – aussi bien globalement que localement - la stratégie de maintenance et son exécution au sein de l'entreprise. Cette analyse cherche également à caractériser le fonctionnement de la maintenance à l'instant To pour le comparer aux meilleures pratiques du secteur industriel concerné et ainsi, montrer l'existence (ou l'inexistence) d'un potentiel d'optimisation de la maintenance au sein de l'entreprise. La première phase se termine par la consolidation - voire la création - des outils et des règles de collecte d'informations nécessaires pour à la fois affiner l'analyse initiale et préparer la mise en place des outils d'optimisation de la maintenance. La deuxième phase utilise les résultats des analyses précédentes pour adapter les outils d'optimisation de la maintenance - proposés dans la méthodologie – aux besoins et contraintes de l'entreprise. Au-delà du simple fait d'apporter des outils d'optimisation à l'entreprise, cette phase permet d'associer et d'intégrer les employés à la démarche d'évolution et de changements des pratiques, pour ainsi créer l'engouement nécessaire à la mise en œuvre pérenne des solutions d'amélioration de la maintenance. La troisième phase consiste à déployer les solutions sur l'ensemble de l'entreprise et à s'assurer de leur pertinence. Cela nécessite certains aménagements organisationnels et la mise en place d'indicateurs. Le choix des outils d'optimisation de la maintenance, ainsi que leur séquencement de mise en œuvre furent réalisés à partir des recommandations de la littérature et en tenant compte des dimensions économiques, techniques et humaines de la maintenance. Cela garantit dans une certaine mesure que la solution proposée soit applicable dans un contexte industriel. De plus, la chronologie de mise en œuvre des outils favorise l'acceptation de ces nouvelles pratiques par les employés. Elle intègre ces outils dans un processus générique de gestion des activités de maintenance sur lequel s'appuyer pour faire évoluer les organisations de maintenance. Ainsi chaque entreprise peut s'appuyer sur ce processus, et par conséquent sur notre méthodologie, pour adapter son organisation. Cet aspect donne à notre méthodologie un caractère universel. L'ensemble des outils proposés (aussi bien techniques, méthodologiques qu'organisationnels) combiné à une chronologie de mise en œuvre constituent le cœur de notre méthodologie. Ces deux éléments favorisent une dynamique de changement à grande échelle et permettent au management de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite l'améliorer.

De manière plus générale, notre méthodologie vise avant tout à s'appliquer aux secteurs industriels où la maintenance représente un enjeu économique et stratégique important. Elle s'adresse essentiellement au management des entreprises industrielles cherchant à optimiser de manière globale et pérenne leur fonction maintenance en s'appuyant sur les nouveaux apports technologiques. Cette méthodologie générique guide les entreprises dans l'évolution de leur organisation de maintenance en proposant un ensemble d'étapes et de prérequis à mettre en œuvre. La méthodologie intègre ainsi des outils d'optimisation de la maintenance autour du processus de maintenance définit par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) et permet leur mise en pratique concrète dans un contexte industriel à grande échelle, élément qui manque actuellement dans la littérature comme le soulignent plusieurs auteurs. De plus, en tenant compte de la dimension humaine de la maintenance et de l'importance des données industrielles dans l'application d'outils d'aide à la décision, notre méthodologie prépare les organisations de maintenance à l'intégration des nouveaux outils de l'industrie 4.0 dans la gestion de leurs activités quotidiennes. Dans cette optique, l'étape d'analyse des données de la première phase de notre méthodologie joue un rôle essentiel.

La méthodologie proposée offre plusieurs avantages et permet la prise en compte des recommandations de la littérature afin d'améliorer la performance de la maintenance. En effet, la méthodologie permet de déployer à grande échelle et en un temps relativement restreint des outils d'optimisation de la maintenance permettant au management de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite l'améliorer de manière pérenne. La mise en place de cette méthodologie permet d'engendrer rapidement des gains économiques importants, et aboutit pour l'entreprise à une organisation de maintenance tournée autour de la donnée dans une démarche d'amélioration continue ; prérequis indispensable pour bénéficier des apports des technologies de l'industrie 4.0. La mise en pratique réalisée dans le chapitre 3 permet au management de s'appuyer sur un cas d'étude ayant conduit à la mise en place de la méthodologie dans un grand service public d'assainissement et de traitement des eaux usées. La méthodologie est directement réutilisable dans d'autres entreprises, et s'accompagne d'un cas d'application pratique, qui peut servir de support et de guide aux praticiens. De ce fait, notre méthodologie représente un moyen de passage da la théorie à la pratique pour les outils d'optimisation de la maintenance et l'intégration des apports des technologies de l'industrie 4.0 dans la gestion quotidienne des activités de maintenance. Il n'existe pas à notre connaissance, d'autre méthodologie générique applicable à un contexte industriel permettant de guider le management de la maintenance dans l'évolution de leur fonction maintenance en vue de l'améliorer en prenant en compte les nouveaux apports technologiques.

D'un point de vue industriel, l'apport de notre thèse peut se résumer en deux points. D'un côté nous avons la méthodologie destinée au management, et de l'autre les résultats obtenus par son application au SIAAP. La méthodologie proposée permet au management des entreprises d'améliorer la performance économique de leur fonction maintenance. Elle guide ainsi le management dans le choix et la mise en œuvre d'outils lui permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite être en mesure de l'améliorer. Les résultats obtenus suite à l'application de notre méthodologie au SIAAP sont dans une certaine mesure des apports industriels spécifiques à cette entreprise. Il s'agit de la nouvelle organisation des activités de maintenance autour du processus définit par (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) avec les outils de pilotage adaptés à l'environnement du SIAAP, et des gains économiques engendrés. Enfin le benchmark des bonnes pratiques de maintenance dans le domaine du traitement et de l'assainissement des eaux usées offre une approximation du niveau de référence des pratiques de maintenance dans ce secteur d'activités.

II. Limitations

Nous avons appliqué notre méthodologie dans une entreprise française du secteur de traitement et d'assainissement des eaux usées. Afin de vérifier le caractère générique de notre solution, il serait intéressant de l'appliquer dans d'autres entreprises avec une organisation ou un secteur d'activité différent. La dimension humaine et managériale étant un facteur important, il serait également pertinent d'appliquer notre méthodologie dans un environnement international. A ce titre, lors d'un échange de deux mois avec l'équivalent du SIAAP pour la ville d'Amsterdam (Waternet), nous avons pu présenter notre méthodologie au management de la maintenance. La méthodologie s'appuyant sur des outils et méthodes universelles, les résultats devraient être semblables à ce que nous avons obtenus pour le SIAAP.

Bien que les premiers résultats obtenus valident la pertinence de la méthodologie, il est nécessaire d'évaluer sur le long terme la performance de la maintenance. La méthodologie a créé une dynamique de changement favorable à la mise en place d'une nouvelle organisation de la maintenance autour d'un processus d'amélioration continue. Il faut à présent s'assurer que ces nouveaux modes de fonctionnement liés à cette organisation perdurent dans le temps. Grâce à une meilleure maîtrise et un pilotage de la fonction maintenance, le management est en capacité de prendre les meilleures décisions à partir de données fiables et d'améliorer encore la performance économique de la maintenance. Les analyses de coûts de cycle de vie s'appuient sur un suivi régulier et rigoureux des activités de maintenance réalisées sur les équipements.

Ainsi, la bonne application des analyses de coûts de cycle de vie lors du renouvellement d'équipements permettrait de s'assurer sur le long terme de la bonne implémentation de la nouvelle organisation.

Pour finir, le faible niveau de qualité des données présentes dans les systèmes d'information du SIAAP ne permet pas en l'état un suivi plus fin des gains engendrés par notre méthodologie. En effet, les apports présentés sont regroupés à l'échelle de l'entreprise et par direction opérationnelle. Pour mesurer et comprendre localement (au niveau des ateliers ou des équipements) les impacts de notre méthodologie, il serait pertinent de l'appliquer dans une entreprise disposant de données de meilleures qualité.

III. Conclusion

Ce travail de thèse a été initié en lien avec le SIAAP pour dans un premier temps répondre à la problématique industrielle suivante « Comment assurer la disponibilité des infrastructures de traitement et de transport des eaux usées au meilleur coût ? ». Une première analyse du contexte et des enjeux de l'entreprise a mis en évidence l'importance de la maintenance dans l'atteinte de cet objectif. En effet, la maintenance contribue fortement à garantir la disponibilité des équipements de production (Muchiri et al., 2011) et ses coûts représentent pour le SIAAP environ un tiers des coûts d'exploitation. Forts de ces premiers constats, nous avons orienté notre état de l'art autour de la maintenance industrielle et de ses modèles d'optimisation. Cela a confirmé le rôle considérable de la maintenance au sein de l'industrie et mis en évidence toute la complexité de cette fonction stratégique, où les dimensions techniques, économiques et humaines sont importantes. La notion de management, et plus particulièrement de management de la maintenance est apparue comme un aspect essentiel en vue d'optimiser la maintenance. Les différents modèles d'optimisation de la maintenance présents dans la littérature, aident dans une certaine mesure le management à prendre les meilleures décisions vis-à-vis de choix impactant le fonctionnement de la maintenance. Cependant, de nombreux modèles d'optimisation de la maintenance s'appuient sur un grand nombre de données dont ne disposent pas (ou partiellement) les entreprises, ce qui rend ces solutions difficilement applicables dans un contexte industriel. Face à ce constat nous avons poursuivi notre étude de l'état de l'art en considérant les apports de l'industrie 4.0 pour la maintenance. Les nouvelles technologies de l'information permettant notamment de récolter et manipuler un grand nombre de données industrielles, elles semblent être une solution pertinente pour pallier ces lacunes et offrent un potentiel d'optimisation de la maintenance non

négligeable. Toutefois, leur mise en œuvre nécessite des moyens financiers importants et la mise en place de certains prérequis organisationnels. Cette analyse nous a permis de construire notre problématique de recherche « *Comment faire évoluer les entreprises d'envergure pour améliorer leur fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques* » et de proposer une hypothèse « *Formalisation d'un modèle managérial globale de la fonction maintenance* » pour y répondre. Notre hypothèse propose d'aborder la fonction maintenance dans sa globalité, de ce fait elle prend en compte la dimension économique de la maintenance, mais également les dimensions techniques et humaines. Afin de vérifier la pertinence de notre hypothèse, nous avons développé une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance destinée au management et permettant d'améliorer la performance économique de la maintenance. Plus en détails, l'objectif de la méthodologie est d'offrir au management les outils lui permettant de maîtriser et piloter la fonction maintenance, pour dans un second temps arriver à son amélioration. La méthodologie se compose de trois grandes phases (analyse de la fonction maintenance, conception et adaptation des outils d'optimisation de la maintenance, et mise en œuvre et pilotage) inspirées des recommandations des méthodes d'accompagnement au changement, et de deux axes d'amélioration (efficacité, et efficience). Dans un second temps, nous avons pu expérimenter notre méthodologie dans le contexte industriel du SIAAP. En l'espace de trois ans, cela a permis à l'entreprise de passer d'une organisation de la maintenance réactive, avec très peu de bonnes pratiques de maintenance implémentées, à une organisation proactive, orientée dans une dynamique d'amélioration continue, avec un niveau de maîtrise important, caractérisé par une forte progression du niveau d'implémentation des bonnes pratiques de maintenance. De plus, la mise l'application de la méthodologie a engendrée un peu plus de cinq millions d'euros d'économie sur les trois années, augmentant ainsi la performance économique de la maintenance au SIAAP. L'expérimentation a également soulevé toute l'importance des données industrielles dans l'optimisation de la maintenance. Notre méthodologie, en organisant les activités de maintenance autour d'un processus d'amélioration continue, et en accordant une attention à la remontée d'informations offre au SIAAP la possibilité de piloter efficacement ses activités de maintenance et d'acquérir un niveau de connaissance nécessaire dans l'optique d'utiliser d'autres modèles et techniques d'optimisation de la maintenance qui requièrent un niveau de données plus important.

Notre méthodologie est une passerelle guidant le management de la maintenance dans l'adoption et l'intégration des nouveaux outils de l'industrie 4.0. Pour cela elle accompagne au sein des entreprises l'évolution de la fonction maintenance permettant au management de

maîtriser et piloter la fonction maintenance pour ensuite l'améliorer à partir de méthodes conventionnelles.

IV. Perspectives

Tout au long de notre projet, nous avons cherché à améliorer la fonction maintenance en prenant en compte les nouveaux apports technologiques. A ce titre les données industrielles et leur maîtrise sont un élément essentiel. Nous présentons ici notre réflexion autour des données pour la maintenance et plus généralement pour la gestion du patrimoine industriel.

1. La gestion de la donnée au cœur du processus de la gestion du patrimoine

Le macro-processus « Gérer le Patrimoine Industriel », au travers de ses 3 étapes clés – Connaître, Maintenir, Investir – s'appuyant respectivement sur les inventaires du patrimoine, la politique de maintenance, et le plan d'évolution des infrastructures, repose sur plusieurs données patrimoniales, techniques et financières (figure 85). Pour garantir sa bonne exécution, cela implique la gestion de ces données.

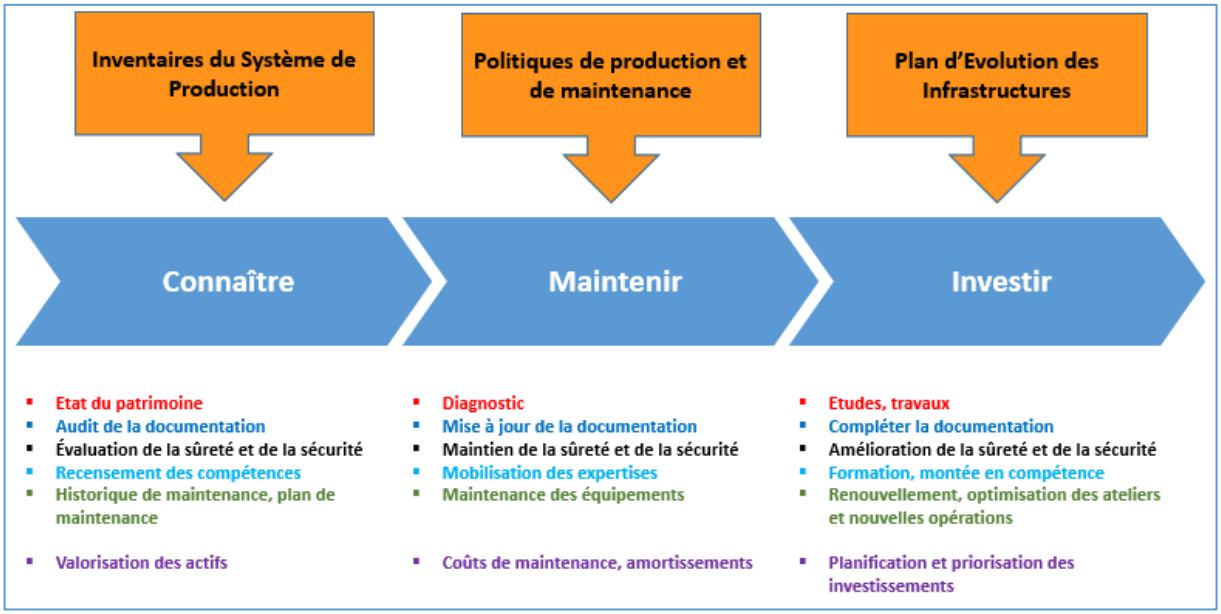


Figure 85: Les informations clés pour le processus « Gérer le Patrimoine Industriel »

L'étape « connaître » à travers l'inventaire et le suivi de l'état du patrimoine, l'audit de la documentation, les historiques et les plans de maintenance offre aux équipes de maintenance la connaissance nécessaire pour préparer les opérations de maintenance. Elle s'appuie sur des données telles que des caractéristiques dimensionnelles des équipements, des données

fonctionnelles ou dysfonctionnelles, des données de représentation graphique, et des données de maintenance. De même la connaissance de la valeur d'acquisition au titre de la valorisation des actifs constitue la première étape financière des analyses de coûts de cycle de vie pour la phase d'acquisition.

Lors de l'étape « maintenir », les opérations de maintenance réalisées en accord avec la politique de maintenance et basées sur les diagnostics nécessitent pour les opérateurs de pouvoir accéder à ces données contextualisées et de les mettre à jour selon les actions réalisées et les évolutions apportées. Par ailleurs, la maîtrise des coûts de maintenance au même titre que celle des coûts de production et des coûts d'indisponibilité constitue la deuxième étape des analyses des coûts de cycle de vie.

Ainsi, connaître et maintenir le patrimoine industriel permet d'optimiser les investissements de renouvellement ou de réhabilitation en accord avec la vision portée par le Plan d'Evolution des Infrastructures et la Stratégie de Gestion Patrimoniale de l'entreprise. Ces investissements se traduisent par des opérations de renouvellement et de réhabilitation des ateliers production ou des travaux neufs. Les opérations apportent de nouvelles données patrimoniales et contribuent ainsi à enrichir la connaissance du patrimoine par leurs entrées dans les actifs. Cette troisième étape des analyses de coûts de cycle de vie, conditionnée par la décision de renouveler ou de faire évoluer les équipements du patrimoine se traduira par une sortie des actifs des équipements démantelés et une entrée dans les actifs des nouveaux équipements.

Les investissements contribuent à l'évolution du patrimoine et par conséquent à l'enrichissement de sa connaissance. Ils inscrivent la gestion du patrimoine de l'entreprise dans une logique d'amélioration continue. A ce niveau l'enjeu pour nous est de réussir à identifier et définir toutes les données nécessaires à la gestion du patrimoine industriel.

2. Comment structurer la gestion de la donnée patrimoniale ?

Pour décliner le macro-processus de gestion du patrimoine, il est nécessaire de structurer celui de la gestion des données. De par leur nature, les activités de maintenance privilégient une approche orientée équipement, il est donc nécessaire d'organiser la donnée en relation avec l'équipement. Ainsi, pour nous inscrire dans une approche globale de coûts de cycle de vie, il est important de comprendre comment s'opère le processus d'acquisition de données, et quelles sont les données qui en sont issues. Nous nous basons ici sur le cas du SIAAP.

Toute installation de procédés nécessite une schématisation PFD[22] pour définir les ateliers procédés, et une schématisation P&ID pour y intégrer les équipements, les instruments et les tuyauteries qui constitueront ces ateliers. Les équipements sont ainsi intégrés au sein d'ateliers fonctionnels et contribuent à assurer cette fonction. Par exemple : les pompes seront les principaux équipements d'un poste de pompage en vue de réaliser la fonction « pomper » tout en sachant que des instruments et tuyauteries seront nécessaires à son fonctionnement. Le schéma P&ID permettra également d'affecter un code P&ID fonctionnel à l'équipement (TAG) qui constituera le code d'identification fonctionnel unique de cet équipement. S'en suivront le dimensionnement de cet équipement, la définition de ses caractéristiques dimensionnelles, mécaniques, hydrauliques, électriques, la définition des instruments de mesure et de sécurité associés (eux même tagués) ainsi que son implantation dans l'atelier avec une représentation 3D. Sous couvert d'une base unique, cet équipement aura des attributs de fonctionnement et de dysfonctionnement dans le système de contrôle-commande, des gammes de maintenance, des pièces détachées associées dans la GMAO, des données pour le suivi en maintenance conditionnelle ainsi que des données constructeurs telle que la notice d'instruction numérique. Toutes ces données techniques seront centralisées dans une base de données consolidée sur le concept d'une base unique. A ces données techniques seront jointes les données économiques, issues du système de gestion et interfacées via la GMAO dans la logique d'un ERP[23].

Sur l'ensemble du cycle de vie des équipements, la phase de conception est celle qui permet d'acquérir initialement les données. Elle est la base de la connaissance du patrimoine industriel de l'entreprise. Pour le SIAAP ces données de conception forment le socle du « connaître » et sont réinitialisées en fin de vie de l'équipement lorsqu'il faut « investir » dans le patrimoine. La phase d'exploitation des équipements (production et maintenance) vient dans un second temps. Elle fait vivre ces données en les actualisant régulièrement selon les opérations de maintenance réalisées.

A l'avenir pour être plus performante, la maintenance s'appuiera davantage sur des données industrielles issues d'autres systèmes d'informations que ceux de GMAO. Ces données alimenteront différents outils d'aide à la décision, permettant au management de prendre les décisions les plus adaptés à son environnement. La plupart de ces données sont définies et actualisées lors des phases de conception et d'exploitation des équipements, puis stockées dans

[22] *Process Flow Diagram* – est un schéma de procédé qui décrit les flux de matière et les équipements principaux d'un procédé.

[23] *Enterprise Resource Planning* – Progiciel de Gestion Intégrée est un système d'information qui permet de gérer et suivre au quotidien, l'ensemble des informations et des services opérationnels d'une entreprise.

différents systèmes d'informations. L'enjeu à ce niveau est de définir un référentiel unique dans lequel structurer les données industrielles d'un équipement tout au long de son cycle de vie. Ce référentiel, que nous appelons « objet patrimonial », permettra d'accéder facilement aux données de l'équipement et de les visualiser sous différentes formes (exemple : cinétique de démontage de l'équipement, schéma P&ID, etc.). La figure 86 illustre ce concept.

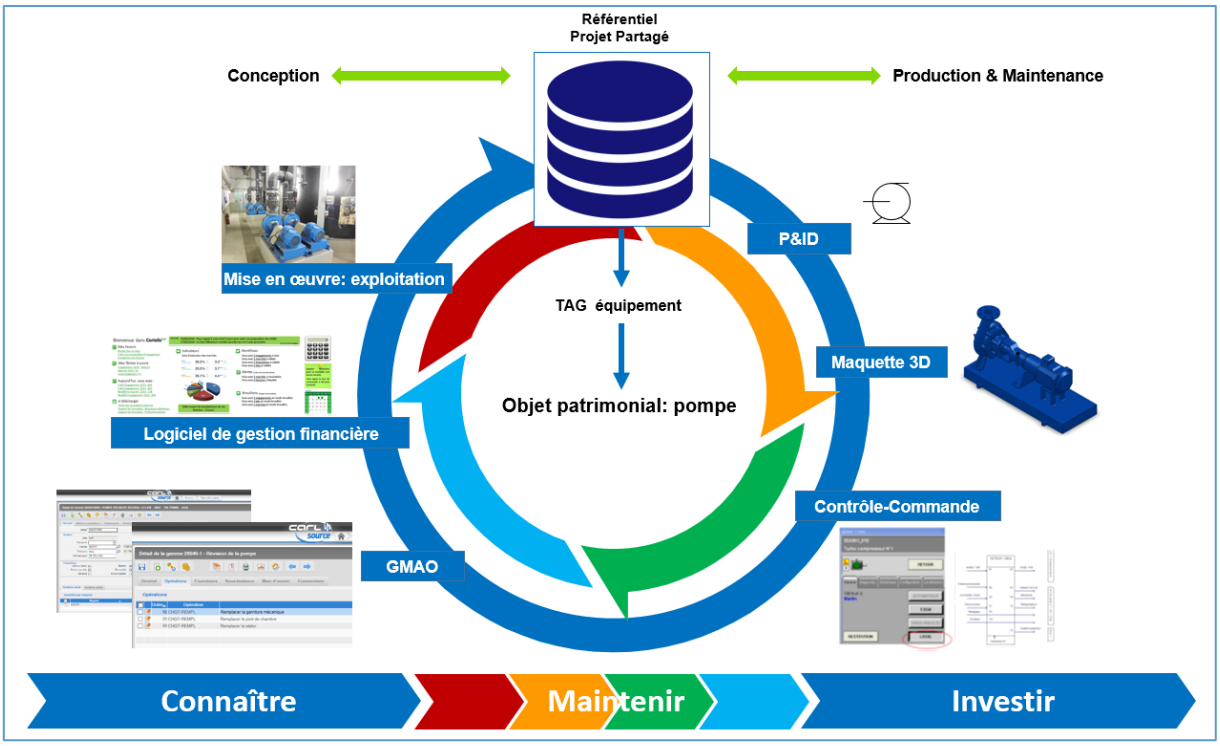


Figure 86: Représentation de la notion "d'objet patrimonial" - exemple pompe

3. Comment seront utilisées et enrichies ces données patrimoniales ?

Les systèmes d'acquisition (Système de contrôle-commande, GMAO, Gestion électronique de données techniques, ERP) ainsi créés permettront à l'opérateur d'accéder à la donnée et de la renseigner lors des opérations de maintenance tout en bénéficiant d'outils numériques mobiles garantissant la mise à jour de la donnée quel que soit la forme du support d'édition ou de visualisation utilisé (ex : tablette numérique, plan imprimé).

Les compléments des données apportés par les opérations de renouvellement et de réhabilitation seront intégrés dans le patrimoine au titre des nouveaux actifs par la mise en œuvre de standards, tels que les objets patrimoniaux génériques, à intégrer dans les études de conception avec un rendu directement capitalisable dans notre système d'information du patrimoine. De même les historiques de fonctionnement et de maintenance contribueront à l'enrichissement de la connaissance de notre patrimoine et ceci même si les investissements de renouvellement se résume au remplacement de l'équipement à l'identique. Le TAG fonctionnel sera inchangé mais

l'équipement de même technologie pourra être d'une autre marque à caractéristiques équivalentes et bénéficiera des nouvelles technologies d'acquisition de données patrimoniales basées sur les IoT.

L'utilisation du concept « objet patrimonial » reste encore à approfondir et à préciser. Cependant, il semble pouvoir proposer une réponse structurée à l'utilisation des nouvelles technologies dans une démarche de gestion des actifs industriels. Nous pouvons alors imaginer une quatrième phase à notre méthodologie concernant autour de cet objet patrimonial avec dans la continuité de la maintenance conditionnelle le développement de la maintenance prévisionnelle. La figure ci-dessous représente cette quatrième phase.

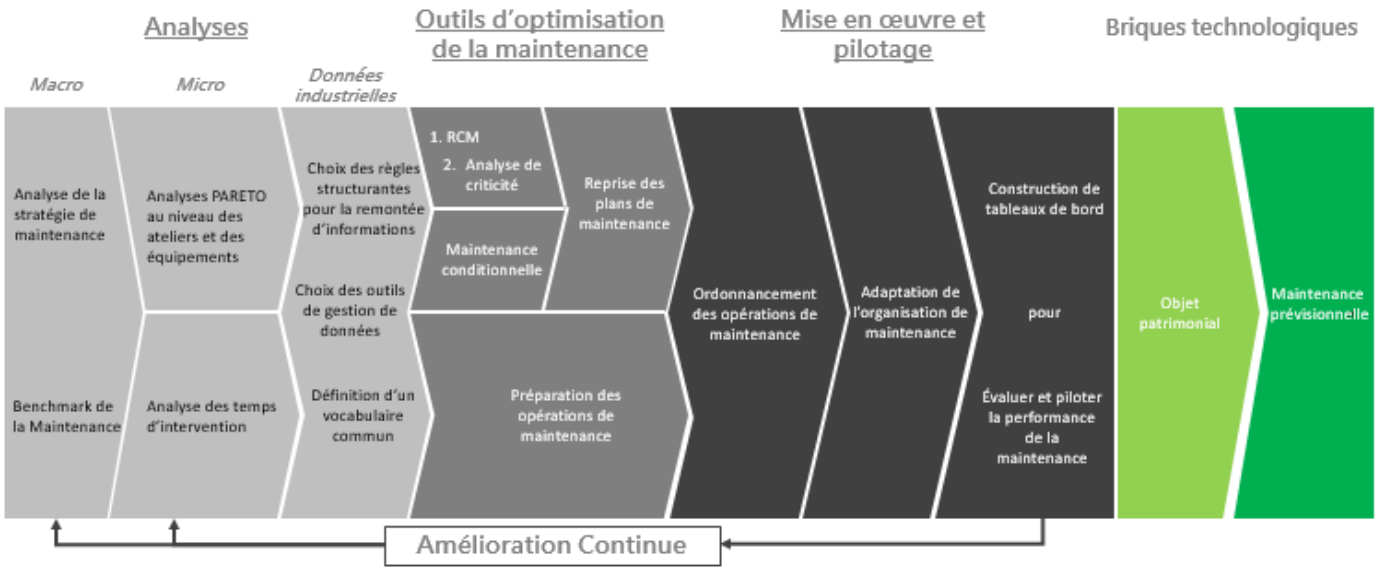


Figure 87: Evolution de la méthodologie

Bibliographie

Ackerman Anderson, L. and Anderson, D. (2010), *The Change Leader's Roadmap: How to Navigate Your Organization's Transformation*, 2nd editio., Pfeiffer, San Francisco CA.

Adjoul, O. (2019), *Développement d'un Modèle Algorithmique Pour l'optimisation Simultanée de La Conception et de La Maintenance Des Systèmes Industriels*.

Adjoul, O., Feugier, A., Benfriha, K. and Aoussat, A. (2019), "Simultaneous Optimization of Design and Maintenance through a Hybrid Process Using Genetic Algorithms", *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, Vol. 13 No. 8, pp. 527–533.

AFNOR. (2002), *FD X 60-000, Maintenance Industrielle*, edited by AFNOR.

AFNOR. (2013), *NF X 60-027, Maintenance - Maintenance Process and Associated Indicators*, edited by AFNOR.

Al-Haddad, S. and Kotnour, T. (2015), "Integrating the organizational change literature: a model for successful change", *Journal of Organizational Change Management*, Vol. 28 No. 2, pp. 234–262.

Alliance Industrie Du Futur. (2018), *La Maintenance : Des Métiers d'avenir !*, available at:https://doi.org/http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2018/03/MetierdelaMaintenance_BATOK.pdf.

Arts, R.H.P.M., Knapp, G.M. and Mann, L. (1998), "Some aspects of measuring maintenance performance in the process industry", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 4 No. 1, pp. 6–11.

Asiedu, Y. and Gu, P. (1998), "Product life cycle cost analysis: State of the art review", *International Journal of Production Research*, Vol. 36 No. 4, pp. 883–908.

de Azevedo, C. (2009), *Guide de Gestion Des Actifs Industriels: Si Les Machines Parlaient...*, edited by DUNOD.

Balogun, J. and Hope-Hailey, V. (2008), *Exploring Strategic Change*, Third edit., Prentice Hall, London.

Bardou, L. (2000), "Soutien logistique intégré", *Techniques de l'ingénieur*, Vol. AG5380V1 No. 0, p. 18.

Bayerl, S.P., Jacobs, G., Denef, S., van den Berg, R.J., Kaptein, N., Birdi, K., Bisogni, F., et al. (2013), "The role of macro context for the link between technological and organizational change", *Journal of Organizational Change Management*, Vol. 26 No. 5, pp. 793–810.

Beer, M. and Nohria, N. (2000), "Cracking the code of change", *Harvard Business Review*, Vol. 78 No. 3, pp. 133–141.

Berger, C., Hees, A., Braunreuther, S. and Reinhart, G. (2016), "Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems", *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., Vol. 41, pp. 638–643.

Blanchard, B.S. (2003), *Logistics Engineering and Management*, Pearson.

Boga, I. and Ensari, N. (2009), "The role of transformational leadership and organizational change on perceived organizational success", *The Psychologist-Manager Journal*, Vol. 12 No. 4, pp. 235–251.

Bogner, E., Voelklein, T., Schroedel, O. and Franke, J. (2016), "Study Based Analysis on the Current Digitalization Degree in the Manufacturing Industry in Germany", *Procedia CIRP*, The Author(s), Vol. 57, pp. 14–19.

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C. and Stahre, J. (2017), "Maintenance in digitalised manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030", *International Journal of Production*

Economics, Elsevier Ltd, Vol. 191 No. October 2016, pp. 154–169.
Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., Wuest, T. and Stahre, J. (2019), "Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization", *International Journal of Production Economics*, Elsevier BV, p. 107534.
Bonde, A.S. and Fulzele, A.C. (2013), "The Organization and management of maintenance function and its effect Over Economies of an Industry", *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3 No. 2, pp. 1152–1155.
BSI PAS 55. (2008), *Asset Management - Part 1: Specification for the Optimized Management of Physical Assets*.
Burnes, B. and Jackson, P. (2011), "Success and Failure In Organizational Change: An Exploration of the Role of Values", *Journal of Change Management*, Vol. 11 No. 2, pp. 133–162.
By, R.T. (2005), "Organisational change management: a critical review", *Journal Journal of Change ManagementJournal of Change Management*, Vol. 5 No. 4, pp. 369–380.
Caiado, R.G.G., Scavarda, L.F., Gavião, L.O., Ivson, P., Nascimento, D.L. de M. and Garza-Reyes, J.A. (2020), "A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management", *International Journal of Production Economics*, Vol. 231 No. July 2020, available at:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883.
Campbell, J.D. and Reyes-Picknell, J. V. (1995), *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, edited by Press, C.
Cheng, S., Azarian, M.H. and Pecht, M.G. (2010), "Sensor systems for prognostics and health management", *Sensors*, Vol. 10 No. 6, pp. 5774–5797.
Choi, T.-M., Wallace, S.W. and Wang, Y. (2018), "Big Data Analytics in Operations Management", *Production and Operations Management*, Vol. 27 No. 10, pp. 1868–1883.
Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, C. and Wæhrens, B.V. (2019), "A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era", *Annual Reviews in Control*, Elsevier Ltd, Vol. 48, pp. 165–177.
Crespo Marquez, A. and Gupta, J.N.D. (2005), "Contemporary maintenance management: Process, framework and supporting pillars", *Omega*, Vol. 34 No. 3, pp. 313–326.
Dekker, R. (1996), "Applications of maintenance optimization models: a review and analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier Science Limited, Vol. 51, pp. 229–240.
Deming, W.E. (1986), *Out of the Crisis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
Dhillon, B.S. (1989), *Life Cycle Costing, Techniques, Models and Applications*, University., Gordon and Breach science publishers, New-York.
Dhillon, B.S. (2017), *Life Cycle Costing for Engineers*, edited by Press, C.
Duffuaa, S.O. and Raouf, A. (2015), *Planning and Control of Maintenance Systems*, *Planning and Control of Maintenance Systems*, available at:https://doi.org/10.1007/978-3-319-19803-3.
Dunn, A. (2006), "Assuring Quality in Maintenance", in Mathew, J., Kennedy, J., Ma, L., Tan, A. and Anderson, D. (Eds.), , Springer, London, pp. 1156–1164.
Dwight, R. (1999), *Frameworks for Measuring the Performance of the Maintenance System in a Capital Intensive Organisation*, *Doctoral Report*, University of Wollongong.
Fatorachian, H. and Kazemi, H. (2018), "A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework", *Production Planning &*

Control, Vol. 29 No. 8, pp. 633–644.
Frank, A.G., Cortimiglia, M.N., Ribeiro, J.L.D. and Oliveira, L.S. de. (2016), "The effect of innovation activities on innovation outputs in the Brazilian industry: Market-orientation vs. technology-acquisition strategies", *Research Policy*, Vol. 45 No. 3, pp. 577–592.
Frank, A.G., Dalenogare, L.S. and Ayala, N.F. (2019), "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies", *International Journal of Production Economics*, Elsevier B.V., Vol. 210 No. April 2019, pp. 15–26.
Franzen, J., Stecken, J., Pfaff, R. and Kuhlenkötter, B. (2019), "Using the Digital Shadow for a Prescriptive Optimization of Maintenance and Operation", *Advances in Production, Logistics and Traffic*, pp. 265–276.
Fraser, K., Hvolby, H.H. and Tseng, T.L.B. (2015), "Maintenance management models: A study of the published literature to identify empirical evidence a greater practical focus is needed", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Emerald Group Publishing Ltd., Vol. 32 No. 6, pp. 635–664.
Fredriksson, G. and Larsson, H. (2012), "An analysis of maintenance strategies and development of a model for strategy formulation-A case study", *Göteborg: Chalmers University of Technology*, available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.7239&rep=rep1&type=pdf%5Cnfiles/184/164964.pdf.
Fumagalli, L., Macchi, M., Colace, C., Rondi, M. and Alfieri, A. (2016), "A Smart Maintenance tool for a safe Electric Arc Furnace", *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Vol. 49 No. 31, pp. 19–24.
Galar, D. and Seneviratne, D. (2016), "Maintenance Performance Measurement & Management", in Galar, D. and Seneviratne, D. (Eds.), *6th International Conference on Maintenance Performance Measurement and Management*, Lulea University of Technology, pp. 1–188.
Galar, D., Stenström, C., Parida, A., Kumar, R. and Berges, L. (2011), "Human factor in maintenance performance measurement", *2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, pp. 1569–1576.
Garg, A. and Deshmukh, S.G. (2006), "Maintenance management: Literature review and directions", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 3, pp. 205–238.
Ghobakhloo, M. (2018), "The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 29 No. 6, pp. 910–936.
Gibert, P. (1980), *Le Contrôle de Gestion Dans Les Organisations Publiques*, Editions d., Paris.
GLADE, M. (2005), *Modélisation Des Coûts de Cycle de Vie: Prévision Des Coûts de Maintenance et de La Fiabilité. Application à l'aéronautique*, Ecole Centrale de Lyon.
Griffith-Cooper, B. and King, K. (2007), "The partnership between project management and organizational change: Integrating change management with change leadership", *Performance Improvement*, Vol. 46 No. 1, pp. 14–20.
Groote, P. De. (1995), "Maintenance performance analysis: A practical approach", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1 No. 2, pp. 4–24.
Grover, V. (1999), "From business reengineering to business process change management: a longitudinal study of trends and practices", *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 46 No. 1, pp. 36–46.
Gupta, M. and George, J.F. (2016), "Information & Management Toward the development of a big data analytics capability", *Information & Management*, Elsevier B.V., Vol. 53 No. 8,

pp. 1049–1064.
Hamel, G. (2000), *Leading the Revolution*, Harvard Business Review Press.
Haroun, A.E. and Duffuaa, S.O. (2009), "Maintenance Organization", *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, available at:https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0.
Harrison, L.M. (2011), "Transformational leadership, integrity, and power", *New Directions for Student Services*, Vol. 35, pp. 45–52.
Hermann, M., Pentek, T. and Otto, B. (2016), "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios", *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, IEEE, pp. 3928–3937.
Hess, T., Matt, C., Benlian, A. and Wiesböck, F. (2016), *Options for Formulating a Digital Transformation Strategy*.
van den Heuvel, M., Demerouti, E. and Bakker, A.B. (2014), "How psychological resources facilitate adaptation to organizational change", *European Journal of Work and Organizational Psychology*, Vol. 23 No. 6, pp. 847–858.
Van Horenbeek, A., Pintelon, L. and Muchiri, P. (2010), "Maintenance optimization models and criteria", *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, Vol. 1 No. 3, pp. 189–200.
Iung, B., Levrat, E., Crespo Marquez, A. and Erbe, H. (2009), "Conceptual Framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms", *Annual Reviews in Control*, Vol. 33 No. 2, pp. 220–229.
Jansson, N. (2013), "Organizational change as practice: a critical analysis", *Journal of Organizational Change Management*, Vol. 26 No. 6, pp. 1003–1019.
Jardine, A.K.S., Lin, D. and Banjevic, D. (2006), "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Academic Press, Vol. 20 No. 7, pp. 1483–1510.
Jayawardene, V., Sadiq, S. and Indulska, M. (2013), "An Analysis of Data Quality Dimensions", *ITEE Technical Report No. 2013-01*, Vol. 01, pp. 1–32.
de Jonge, B. and Scarf, P.A. (2019), "A review on maintenance optimization", *European Journal of Operational Research*, Vol. 047, pp. 1–40.
Judson, A.S. (1991), *Changing Behavior in Organizations: Minimizing Resistance to Change*, 2nd revise., Blackwell Publisher.
Kagermann, H., Wahlster, W. and Helbig, J. (2013), *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, *Acatech - National Academy of Science and Engineering*.
Kaiser, H.H. (1991), *Maintenance Management Audit : A Step by Step Workbook to Better Your Facility's Bottom Line*, R.S. Means Co., Kingston, MA.
Kamble, S.S., Gunasekaran, A. and Gawankar, S.A. (2018), "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 117 No. 408–425, available at:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009.
Kanter, R.M., Stein, B.A. and Jick, T.D. (1992), *The Challenge of Organizational Change: How Companies Experience It and Leaders Guide It*, First Edit., The Free Press.
Karim, R., Westerberg, J., Galar, D. and Kumar, U. (2016), "Maintenance Analytics – The New Know in Maintenance", *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., Vol. 49 No. 28, pp. 214–219.
Kasper, J. and Miklovic, D. (2017), "APM 4.0 : Redefining Asset Lifecycle for Industry 4.0", *LNS Research*, available at:

https://blog.lnsresearch.com/apm40ebook#sthash.pU3cRUYd.dpbs (accessed 24 April 2020).
Kelly, A. (1997), *Maintenance Strategy: Business-Centred Maintenance*, Butterworth-Heinemann.
Kenny, J. (2006), "Strategy and the learning organization: A maturity model for the formation of strategy", *The Learning Organization*, Vol. 13 No. 4, pp. 353–368.
Knights, P.F. (2001), "Rethinking Pareto analysis: maintenance applications of logarithmic scatterplots", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 7 No. 4, pp. 252–263.
Koh, L., Orzes, G. and Jia, F. (2019), "Guest editorial", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 39 No. 6-7–8, pp. 817–828.
Kotnour, T. (2011), "An emerging theory of enterprise transformations", *Journal of Enterprise Transformation*, Vol. 1 No. 1, pp. 48–70.
Kotter, J. (1996), *Leading Change*, Harvard Business Review Press.
Kumar, U. and Galar, D. (2018), "Maintenance in the era of industry 4.0: issues and challenges.", *Quality, IT and Business Operations*, pp. 231–250.
Kumar, U., Galar, D., Parida, A., Stenström, C. and Berges, L. (2013), "Maintenance performance metrics: A state-of-the-art review", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 19 No. 3, pp. 233–277.
Kuo, T.-C., Huaung, S.H. and Zhang, H.-C. (2001), "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives", *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 41 No. 3, pp. 241–260.
Lamba, K. and Singh, S.P. (2017), "Big data in operations and supply chain management: current trends and future perspectives", *Production Planning & Control*, Vol. 28 No. 11–12, pp. 877–890.
Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T. and Hoffmann, M. (2014), "Industry 4.0", *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 6, pp. 239–242.
Lavina, Y. (2005), *Amélioration Continue En Maintenance - Techniques d'audit et Plan de Progrès*, edited by Dunod.
Lee, J., Jin, C., Liu, Z. and Ardakani, H.D. (2017), "Introduction to Data-Driven Methodologies for Prognostics and Health Management", *Probabilistic Prognostics and Health Management of Energy Systems*, pp. 9–32.
Lewin, K. (1946), "Action Research and Minority Problems", *Journal of Social Issues*, Vol. 2 No. 4, pp. 34–46.
Lister, T. (2012), "Wrench Time", *Asset Management & Maintenance Journal*, Vol. 25 No. 3, pp. 7–8.
Liu, Q., Dong, M., Chen, F.F., Liu, W. and Ye, C. (2020), "Multi-objective imperfect maintenance optimization for production system with an intermediate buffer", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 56, pp. 452–462.
Louit, D., Pascual, R., Banjevic, D. and Jardine, A.K.S. (2011), "Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 62 No. 6, pp. 992–1004.
Luecke, R. (2003), *Managing Change and Transition*, Harvard Business Review Press.
Lynch, R.L. and Cross, K.F. (1991), *Measure Up!: Yardsticks for Continuous Improvement*, Blackwell Business.
Marais, K.B. and Saleh, J.H. (2009), "Beyond its cost, the value of maintenance: An analytical framework for capturing its net present value", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94 No. 2, pp. 644–657.

Maranzana, N. (2009), *Amélioration de La Performance En Conception Par l'apprentissage En Réseau de La Conception Innovante*, Université de Strasbourg.
Márquez, A.C., De León, P.M., Fernndez, J.F.G., Márquez, C.P. and Campos, M.L. (2009), "The maintenance management framework: A practical view to maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 2, pp. 167–178.
Maskell, B.H. (1991), *Performance Measurement for World Class Manufacturing*, Productivity Press, New-York,NY.
McKinsey & Company. (2015), *Industry 4.0 How to Navigate Digitization of the Manufacturing Sector*.
McKinsey & Company. (2016), "The 'how' of transformation", *McKinsey Quarterly*.
McKinsey & Company. (2018), "Why data culture matters", *McKinsey Quarterly*.
McKinsey & Company. (2020), *The Future of Maintenance for Distributed Fixed Assets*.
Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J.-L., Bouten, N., De Turck, F. and Boutaba, R. (2016), "Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18 No. 1, pp. 236–262.
Mikler, J. (2015), *On Improvement Of Maintenance Function - A Reference Model And Improvement Methodology*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
Mittal, S., Khan, M.A., Romero, D. and Wuest, T. (2018), "A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 49, pp. 194–214.
Monchy, F. and Vernier, J. (2010), "Maintenance - Méthodes et organisations", No. 3ème édition.
Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., et al. (2016), "Cyber-physical systems in manufacturing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65 No. 2, pp. 621–641.
Moran, W. and Brightman, B.K. (2000), "Leading organizational change", *Journal of Workplace Learning*, Vol. 12 No. 2, pp. 66–74.
Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L. and Martin, H. (2011), "Development of maintenance function performance measurement framework and indicators", *International Journal of Production Economics*, Vol. 131 No. 1, pp. 295–302.
Mungani, D.S. and Visser, J.K. (2013), "Maintenance Approaches for Different Production Methods", *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol. 24 No. 3, pp. 1–13.
Murray, M., Fletcher, K., Kennedy, J., Kohler, P., Chambers, P.J. and Ledwidge, P.T. (1995), "Maintenance Engineering Society of Australia: Generic Definition of Maintenance", No. 1, pp. 1–13.
Murthy, D.N.P., Atrens, A. and Eccleston, J.A. (2002), "Strategic maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 8 No. 4, pp. 287–305.
Nakajima, S. (1988), *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*, edited by Productivity Press, Cambridge, MA.
Nascimento, D.L.M., Garza-Reyes, J.A. and Rocha-Lona, L. (2019), "Exploring Industry 4 . 0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context A business model proposal", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 30 No. 3, pp. 607–627.
NF-EN-13306. (2010), *Maintenance - Terminologie de La Maintenance*, edited by AFNOR.
NF-EN-15341. (2007a), "Indicateurs de performance clés pour la maintenance", p. 29.
NF-EN-15341. (2007b), *Indicateurs de Performance Clés Pour La Maintenance*.
NF-X60-010. (1984), *Vocabulaire de Maintenance et de Gestion Des Biens Durables*.

NF ISO 55000. (2014), *Gestion d'actifs - Aperçu Général, Principes et Terminologie*.
Nowlan, F.S. and Heap, H.F. (1978), *Reliability-Centred Maintenance (RCM)*, *United Airlines Publications*, San Francisco CA.
Oesterreich, T.D. and Teuteberg, F. (2016), "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry", *Computers in Industry*, Vol. 83, pp. 121–139.
Oldham, J. (2009), "Achieving large system change in health care", *Journal of the American Medical Association*, Vol. 301 No. 9, pp. 965–966.
Oztemel, E. and Gursev, S. (2018), "Literature review of Industry 4.0 and related technologies", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer US, Vol. 31 No. 1, pp. 127–182.
Palmer, R.D. (2013), *Maintenance Planning & Scheduling Handbook*, edited by McGraw-Hill.
Parida, A. and Chattopadhyay, G. (2007), "Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement (MPM)", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 3, pp. 241–258.
Parida, A. and Kumar, U. (2006), "Maintenance performance measurement (MPM): Issues and challenges", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 3, pp. 239–251.
Parkes, D. (1970), *Operational Research in Maintenance*, edited by Jardine, A.K.S., University of Manchester Press.
Pham, H. and Wang, H. (1996), "Imperfect maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94 No. 3, pp. 425–438.
Pintelon, L. and Parodi-herz, A. (2008), "Maintenance : An Evolutionary Perspective", *Complex System Maintenance Handbook*, pp. 21–48.
Pintelon, L. and Parodi-herz, A. (2015), "Maintenance : An Evolutionary Perspective Maintenance", available at:https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7.
Pintelon, L. and Parodi-Herz, A. (2008), "Maintenance: An Evolutionary Perspective", *Springer Series in Reliability Engineering*, Vol. 8, Springer-Verlag London Ltd, pp. 21–48.
Pintelon, L. and Van Puyvelde, F. (2006), *Maintenance Decision Making*, Leuven, Belgium, Acco.
PR-NF-EN-17007. (2016), "Processus maintenance et indicateurs associés", p. 126.
PricewaterhouseCoopers. (1999), *Questionnaire of Auditing*, Toronto, ON.
Qin, J., Liu, Y. and Grosvenor, R. (2016), "A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond", *Procedia CIRP*, The Author(s), Vol. 52, pp. 173–178.
Rachele, J. (2012), "The Diversity Quality Cycle: Driving culture change through innovative governance", *AI & Society*, Vol. 27 No. 3, pp. 399–416.
Raouf, A., Duffuaa, S., Ben-Daya, M., Pintelon, L., Pinjala, S.K. and Vereecke, A. (2006), "Evaluating the effectiveness of maintenance strategies", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 1, pp. 7–20.
Ras, E., Wild, F., Stahl, C. and Baudet, A. (2017), "Bridging the Skills Gap of Workers in Industry 4.0 by Human Performance Augmentation Tools: Challenges and Roadmap", *PETRA '17: Proceedings of the 10th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, pp. 428–432.
Rasovska, I. and Zerhouni, N. (2006), "Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d'e-maintenance.", *Automatique*, Vol. Doctorat, p. 186.

Roda, I., Macchi, M. and Fumagalli, L. (2018), "The Future of Maintenance Within Industry 4.0: An Empirical Research in Manufacturing", *International Conference on Advances in Production Management Systems*, Springer, Cham, pp. 39–46.

Rødseth, H. and Schjølberg, P. (2017), "Maintenance backlog for improving integrated planning", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 23 No. 2, pp. 195–225.

Rødseth, H., Strandhagen, J.O. and Schjølberg, P. (2015), "Key performance indicators for integrating maintenance management and manufacturing planning and control", *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Vol. 459, pp. 70–77.

Roy, R., Stark, R., Tracht, K., Takata, S. and Mori, M. (2016), "Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65 No. 2, pp. 667–688.

Sasikala, B. (2017), "Internet of Things: A Survey on Security Issues Analysis and Countermeasures", *International Journal Of Engineering And Computer Science*, Vol. 6 No. 5, pp. 21435–21442.

Scarf, P.A. (1997), "On the application of mathematical models in maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 99 No. 3, pp. 496–506.

Schermerhorn, J. (2007), *Management*, edited by Sons, J.W.&, New-York.

Schuh, G.G., Anderl, R., Gausemeier, J.J., ten Hompel, M.M., Wahlster, W. (Eds. ., Ander, Lr., Gausemeier, J.J., et al. (2020), *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies*, *Acatech Study*, available at: www.acatech.de/publikationen.

Shahin, A. (2014), "A Comprehensive Approach for Maintenance Performance Measurement Arash Shahin", No. March.

Sharma, A., Yadava, G.S. and Deshmukh, S.G. (2011), "A literature review and future perspectives on maintenance optimization", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 29 March.

Sherwin, D. (2000), "A review of overall models for maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 6 No. 3, pp. 138–164.

Swanson, L. (2001), *Linking Maintenance Strategies to Performance*, *Int. J. Production Economics*, Vol. 70.

Syan, C.S. and Ramsoobag, G. (2019), "Maintenance applications of multi-criteria optimization: A review", *Reliability Engineering and System Safety*, Elsevier Ltd, 1 October, available at:https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106520.

Takahashi, Y. and Osada, T. (1990), *TPM, Total Productive Maintenance*, Asian Productivity Organization, Tokyo, Japan.

Tian, Z., Lin, D. and Wu, B. (2012), "Condition based maintenance optimization considering multiple objectives", *JOurnal of INtelligent Manufacturing*, Vol. 23 No. 2, pp. 333–340.

Tsang, A.H. c. (2002), "Strategic dimensions of maintenance management", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.

Vanneste, S.G. and Van Wassenhove, L.N. (1995), "An integrated and structured approach to improve maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 82 No. 2, pp. 241–257.

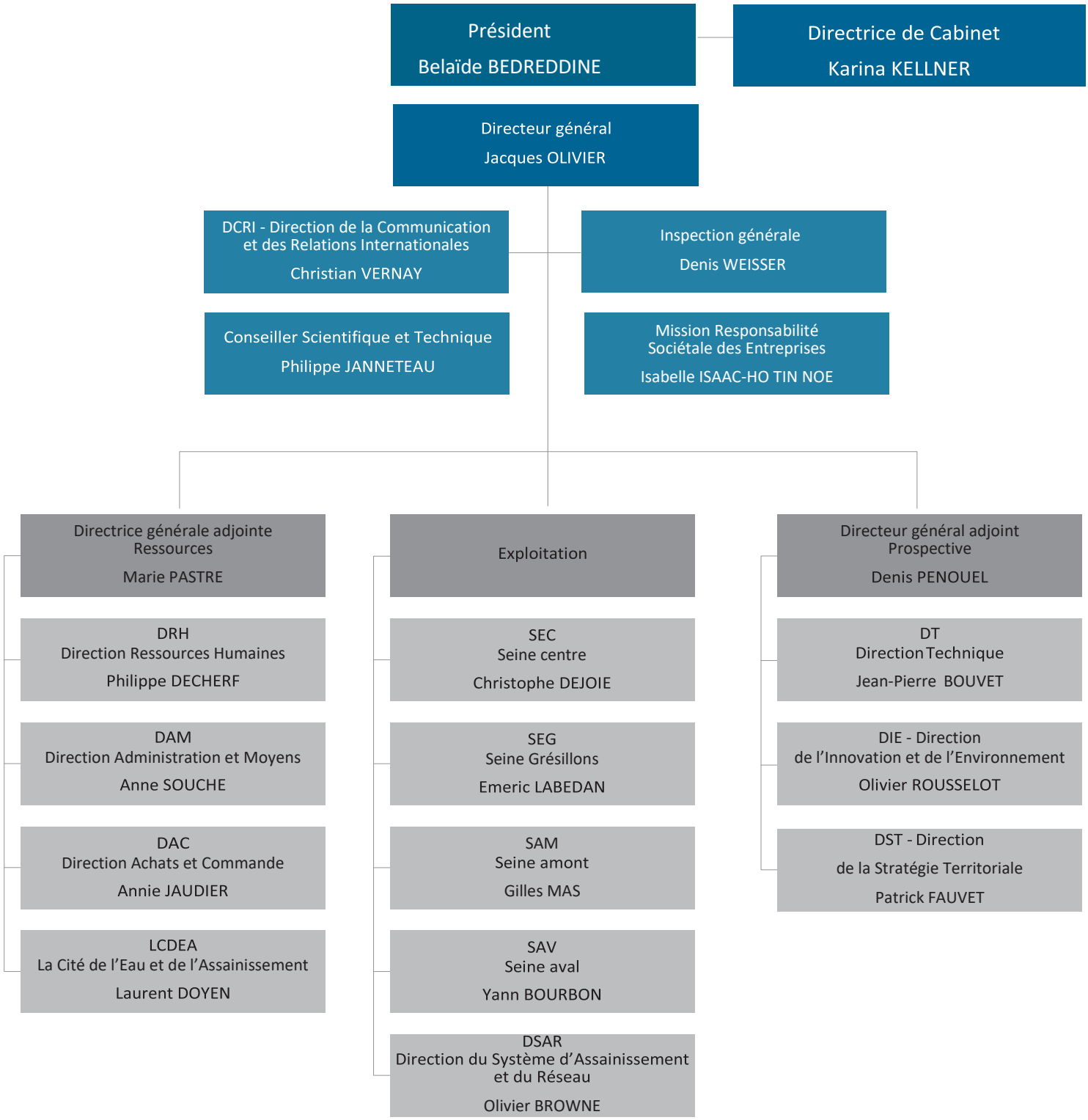
Velmurugan, R.S. and Dhingra, T. (2015), "Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 35 No. 12, pp. 1622–1661.

Visser, J.K. (1998), "Modelling maintenance performance: a practical approach", *IMA Conference*, Edinburgh.

Waeyenbergh, G. and Pintelon, L. (2002), “A framework for maintenance concept development”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 77, pp. 299–313.
Wang, H. (2002), “A survey of maintenance policies of deteriorating systems”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 139 No. 3, pp. 469–489.
Weking, J., Stöcker, M., Kowalkiewicz, M., Böhm, M. and Krcmar, H. (2020), “Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 225 No. December 2019, available at:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107588.
Westerkamp, T.A. (1992), *Maintenance Manager’s Standard Manual*, Prentice Hall Trade, Englewood Cliffs, NJ.
Wireman, T. (1998), *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*, Industrial Press Inc.
Wireman, T. (2015), *Benchmarking Best Practices for Maintenance, Reliability and Asset Management - Third Edition*, edited by Press, I.
Worren, N., Ruddle, K. and Moore, K. (1999), “From Organizational Development to Change ManagementThe Emergence of a New Profession”, *The Journal of Applied Behavorial Science*, Vol. 35 No. 3, pp. 273–286.
Wouters, M. and Sportel, M. (2005), “The role of existing measures in developing and implementing performance measurement systems”, *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 25 No. 11, pp. 1062–1082.
X60-500. (1988), *Terminologie Relative à La Fiabilité - Maintenabilité - Disponibilité*.
Xu, L. Da, Xu, E.L. and Li, L. (2018), “Industry 4.0: state of the art and future trends”, *International Journal of Production Research*, Vol. 56 No. 8, pp. 2941–2962.
Zancolich, J. (2002), “Auditing maintenance processes for plant efficiency”, available at: www.mt- online.com/december2000/auditing-maintenance-processes-for-plant-efficiency (accessed 25 March 2013).
Zook, C. (2007), “Finding your next CORE business”, *Harvard Business Review*, pp. 66–75.
Zwingelstein, G. (2014), *Évaluation de La Criticité Des Équipements Méthodes d ’ Exploitation Des Jugements d ’ Experts*, *Technique de l’Ingénieur*, Vol. 33.
Zwingelstein, G. (2015a), “Évaluation de la criticité des équipements - Méthodologie globale”, *Techniques de l’Ingénieur*, No. SE 4 007, pp. 1–24.
Zwingelstein, G. (2015b), *Méthodes de Maintenance Basées Sur La Fiabilité et Sur Les Risques*, *Techniques de l’Ingénieur*.

Annexes

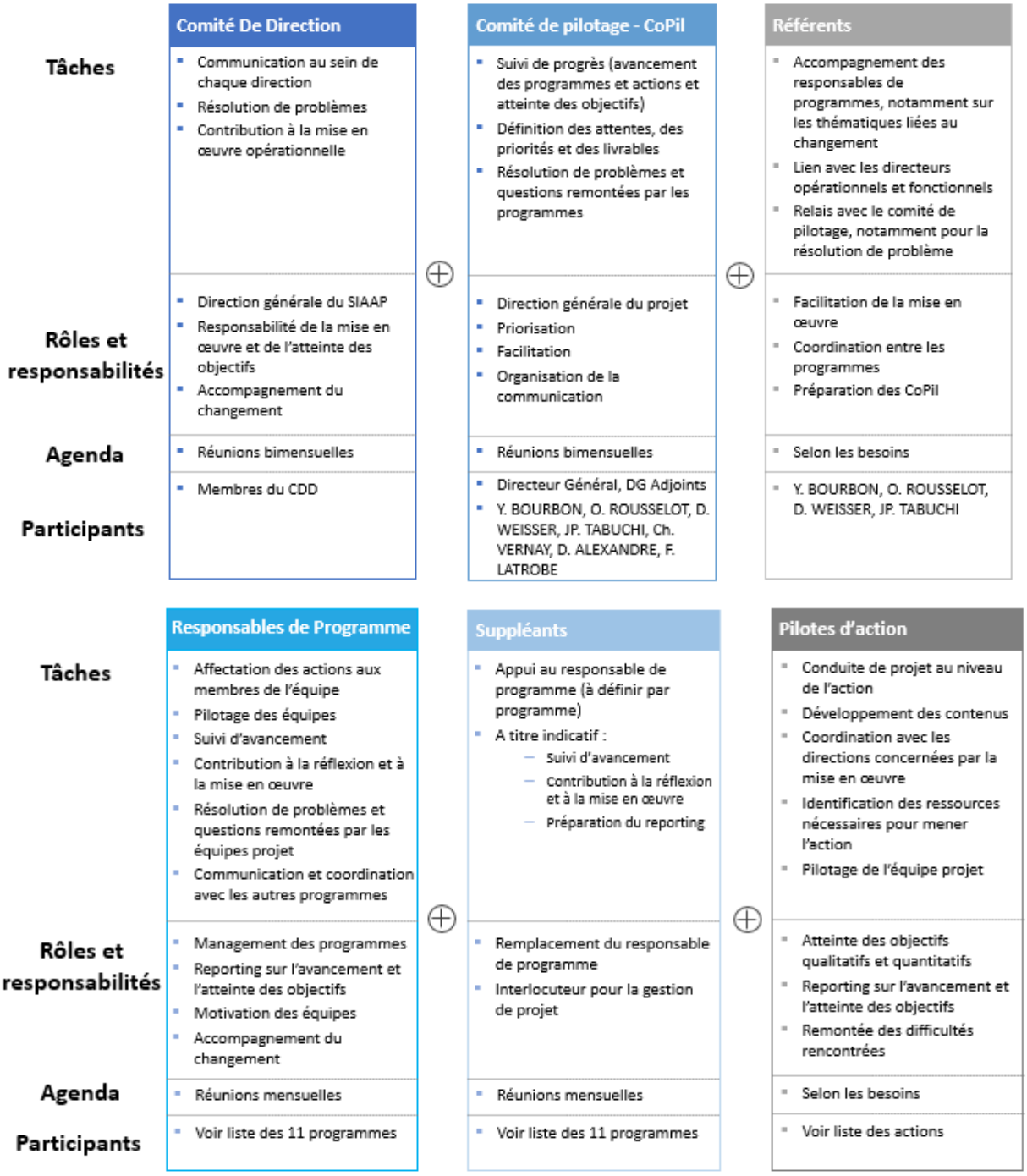
Annexe 1 – Organigramme du SIAAP au 1er octobre 2017.



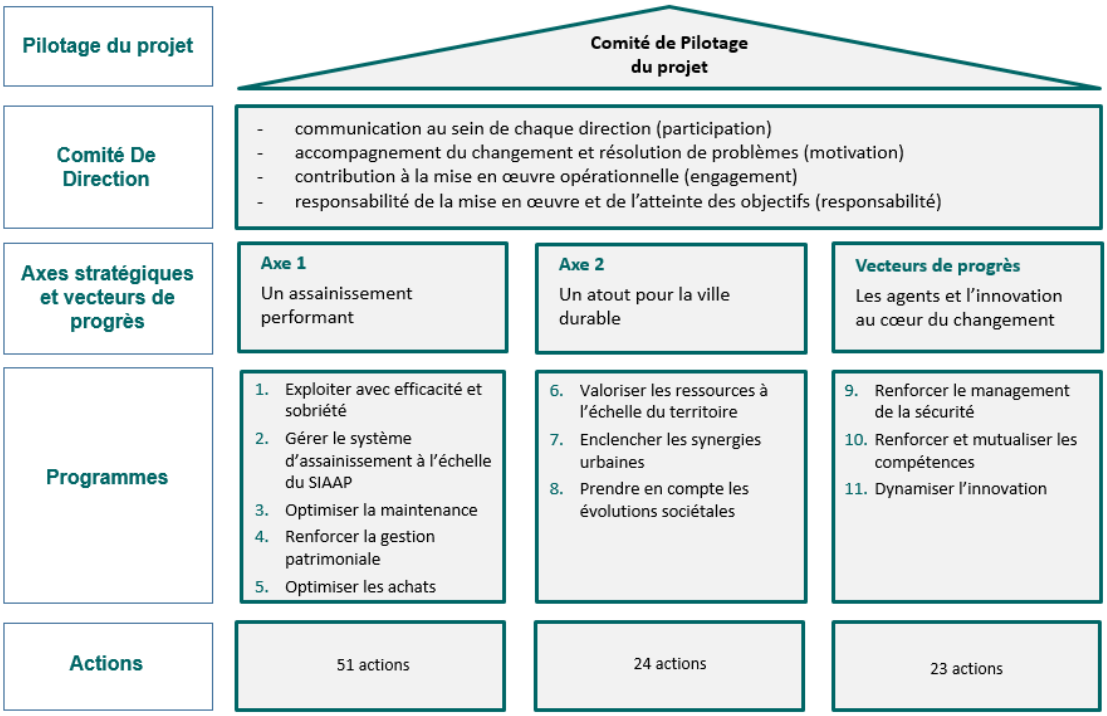
Annexe 2 - Les principales technologies de l'industrie 4.0

Technologie	Description	Références
CPS	C'est un système intégrant de l'électronique, du logiciel, des capteurs et des actionneurs et dotés de capacité de communication. Un CPS interagit avec son environnement dans lequel il prend des données, les traite et au travers d'une boucle de rétroaction contrôle ou influence le processus auquel il est associé.	(Frank et al., 2019) (Berger et al., 2016)
IoT	C'est l'interconnexion de dispositifs physiques, intégrés à l'électronique, aux logiciels, aux capteurs, aux actionneurs et à la connectivité de réseau qui permettent à ces objets de collecter et d'échanger des données. L'IoT permet aux objets d'être détectés ou contrôlés à distance.	(Sasikala, 2017) (Fatorachian and Kazemi, 2018)
BDA	Il s'agit de l'utilisation de techniques d'analyse de données basées sur l'intelligence artificielle telles que les algorithmes de *machine learning* et de *deep learning* pour essayer d'extraire des informations et de la connaissance à partir d'une grande quantité de données. Cela favorise la prise de décision basée sur la donnée.	(Gupta and George, 2016), (Lamba and Singh, 2017)
Cloud Computing	C'est un terme général employé pour désigner la livraison de ressources et de services à la demande par internet. Il désigne le stockage et l'accès aux données par l'intermédiaire d'internet plutôt que via le disque dur d'un ordinateur. Il permet de stocker et manipuler de grandes quantités de données	(Frank et al., 2019) (Xu et al., 2018)
Cyber sécurité	Il s'agit d'un domaine consacré à la sauvegarde de la protection, de la confidentialité, et de l'intégrité des données stockées ou transmises au sein des entreprises.	(Ghobakhloo, 2018) (Berger et al., 2016)
Fabrication additive	C'est un ensemble de technologies permettant de développer des objets en trois dimensions grâce à la fabrication couche par couche contrôlée par un ordinateur. Elle permet de fabriquer des objets à géométrie complexe ou possédant des couches de différents matériaux.	(Kamble et al., 2018), (Nascimento et al., 2019)
VR/AR	La Réalité Augmentée (AR) est une version améliorée de la réalité où des images de synthèse sont superposées à des équipements physiques réels. La Réalité Virtuelle (VR) permet de simuler numériquement un environnement, et offre à ses utilisateurs une expérience d'immersion.	(Ras et al., 2017), (McKinsey & Company, 2015)
Robotique avancée	Les robots collaboratifs imitent les actions humaines, travaillent de manière autonome, et possèdent des capacité d'apprentissage importantes.	(Ghobakhloo, 2018)

Annexe 3 - Rôles et responsabilités des différents niveaux de gouvernance du projet « SIAAP 2030 »



Annexe 4 – Structure par projets de la deuxième phase du projet d'entreprise « SIAAP 2030 »



Programme 3 – « Optimiser la maintenance » :

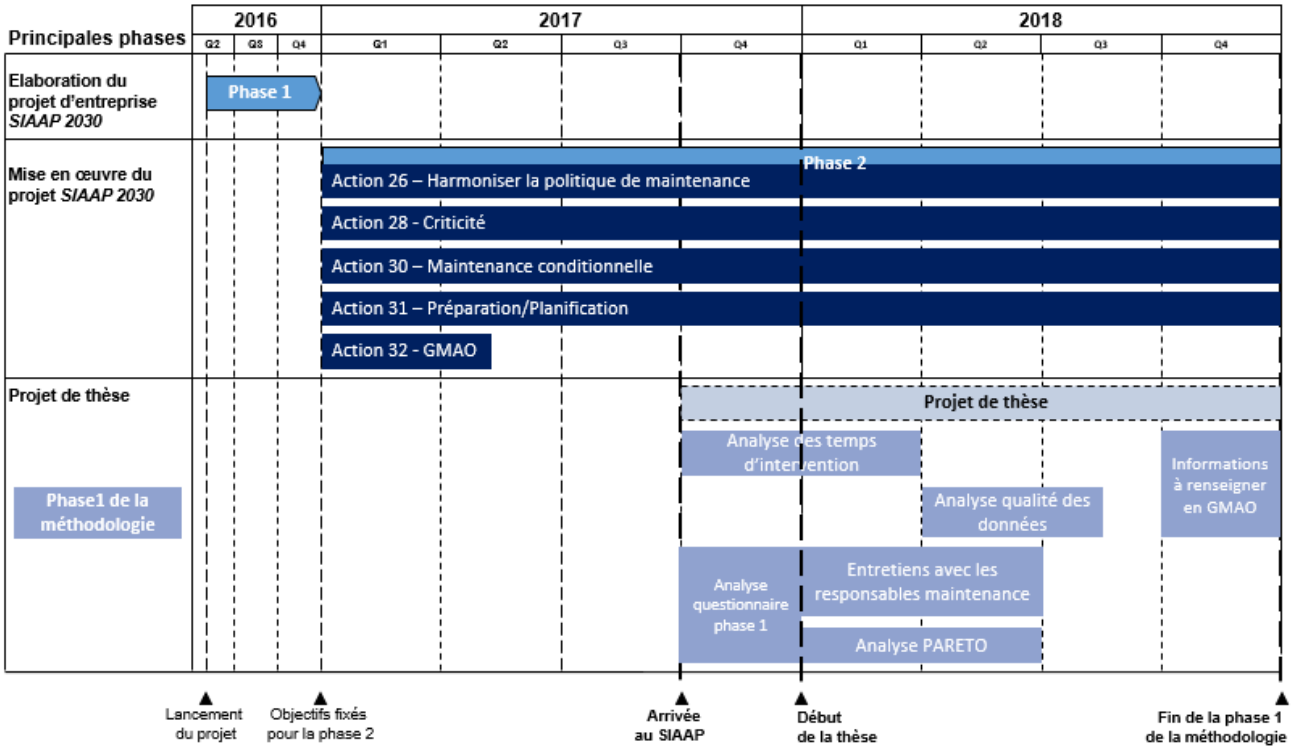
- Action 26. Harmoniser la politique de maintenance à travers les outils et les pratiques ;
- Action 27. Définir les fonctions de la maintenance à centraliser et les mettre en place ;
- Action 28. Définir et mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de la criticité des équipements ;
- Action 29. Harmoniser les indicateurs de disponibilité des installations ;
- Action 30. Améliorer et développer la maintenance conditionnelle ;
- Action 31. Homogénéiser, améliorer et mieux formaliser la planification de la maintenance en s'appuyant sur la GMAO ;
- Action 32. Harmoniser l'utilisation de la GMAO sur l'ensemble des directions du SIAAP ;
- Action 33. Réorganiser la planification pluriannuelle de manière à mieux la coordonner (intersites - exploitation centrale) ;
- Action 34. Optimiser la gestion des stocks ;
- Action 35. Mettre en place un « atelier central » ;
- Action 36. Évaluer le potentiel d'internalisation ;
- Action 37. Améliorer la gestion documentaire afin de prendre en compte toutes les modifications techniques importantes.

Programme 4 – « Renforcer la gestion patrimoniale et la maîtrise du processus d'investissement » :

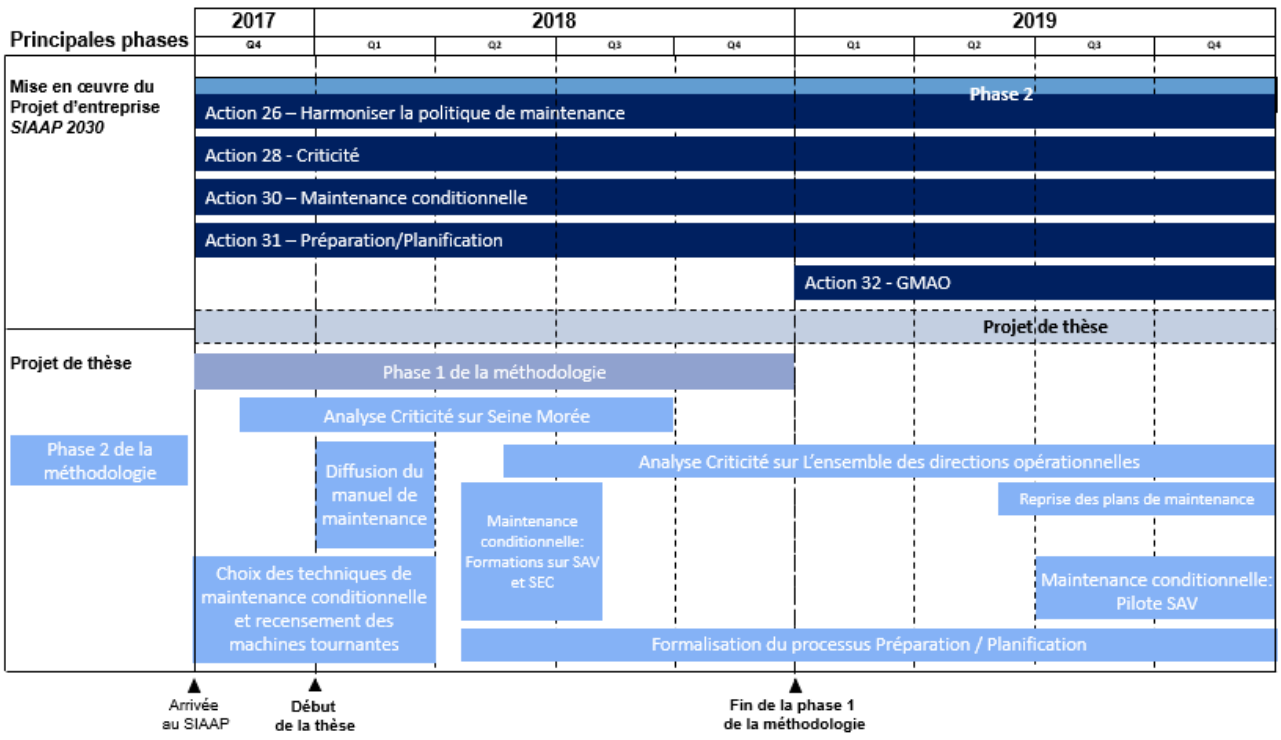
- Action 38. Réaliser un diagnostic physique du patrimoine et mettre en œuvre un processus de suivi du bâti et des équipements ;
- Action 39. Compléter la méthode et la gouvernance pour prioriser les investissements de renouvellement ;
- Action 40. Redéfinir l'organisation des futurs projets neufs dans un contexte de fin de grands travaux de Conception/Réalisation ;
- Action 41. Consolider l'inventaire physique et comptable des actifs ;
- Action 42. Redéfinir et coordonner le support technique ;
- Action 43. Améliorer la connaissance et le suivi du patrimoine foncier pour garantir la pérennité des ouvrages et leur accès.

Annexe 5 – Planning de déploiement des différentes étapes de la méthodologie dans le cadre du projet d'entreprise « *SIAAP 2030* »

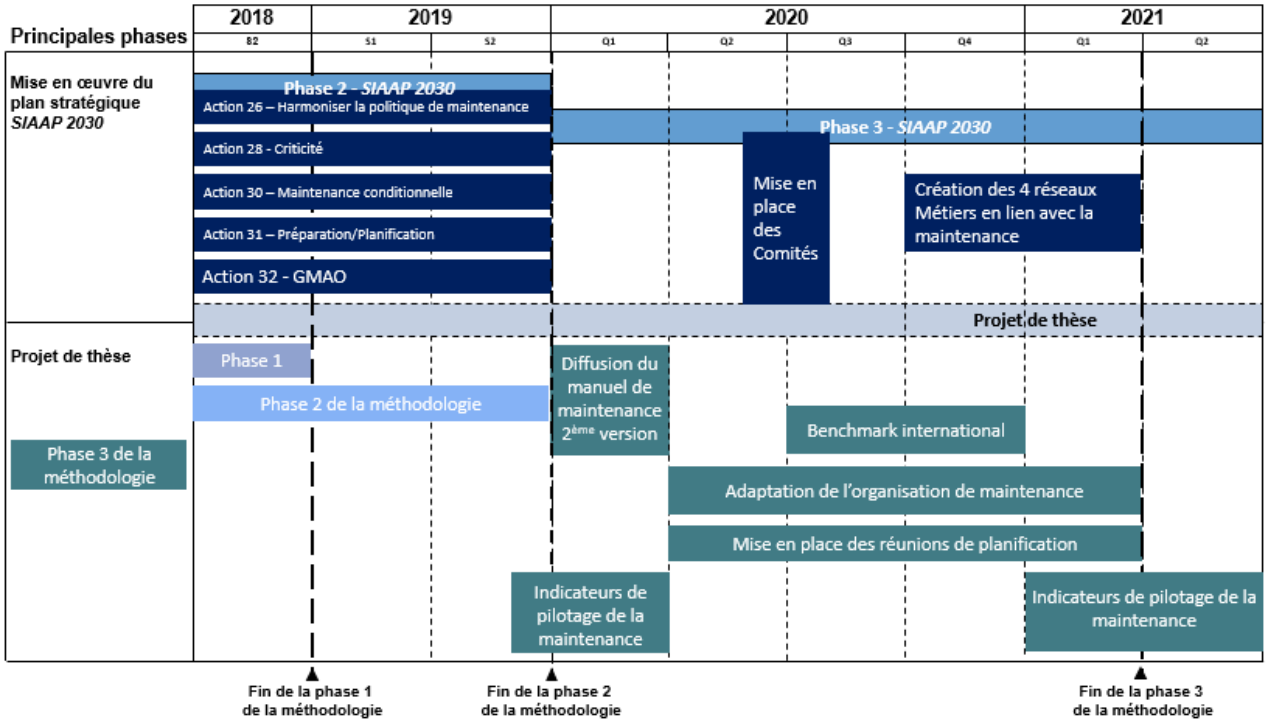
1. Planning de déploiement des étapes de la phase 1



2. Planning de déploiement des étapes de la phase 2



3. Planning de déploiement des étapes de la phase 3



Annexe 6 – Analyse de la maintenance et de la gestion patrimoniale : Extraits des réponses au questionnaire réalisé en phase 1 du projet « SIAAP 2030 »

Thématiques	Questions	Direction des Réseaux	Seine Amont	Seine Aval	Seine Grésillons	Valenton	Seine Centre
Politique de maintenance	**Existe-t-il une politique de maintenance définie sur le site ?**	Non	Pas pour l'instant. Politique non formalisée, mais priorité donnée aux équipements nécessitant une forte disponibilité.	Non, pas de document formalisé	En cours de définition. Principe : privilégier le préventif sur une usine neuve.	Une procédure définit la politique.	Pas de politique de maintenance formalisée. Maintenance préventive systématique privilégiée.
	Quelles terminologies sont utilisées dans la politique de maintenance ?	-	Maintenance corrective, préventive systématique, contrôle réglementaire.	Maintenance corrective, préventive systématique, contrôle réglementaire.	Correctif, amélioration, réglementaire.	Systématique, « Risk Based Inspection », prédictif et conditionnelle.	Correctif, réglementaire, amélioration.
	Quel type de maintenance est utilisé ?	Systématique, pas de conditionnelle (à l'étude)	Systématique et correctif. Conditionnelle: caméra thermique, analyse d'huile et analyse vibratoire.	Préventif conditionnel essentiellement	Systématique, conditionnelle (caméra thermique, vibratoire sur seuil prévu).	Systématique, « Risk Based Inspection », prédictif et conditionnelle.	Correctif, systématique, conditionnelle, prédictif.
Analyses de Criticité	**Est-ce que des études de criticité ont été réalisées sur les deux dernières années ? Quelle fréquence de mise à jour ? Quel type d'analyse ?**	Oui, 3. Démarche initiée, pas encore de périodicité de mise à jour définie. Outils AMDEC	Non. Etudes de criticité réalisées par les groupements mais peu utilisée et non mise à jour.	Oui. Analyse effectuée par le service méthode et mise à jour tous les 6 mois en fonction des fiches projet Etudes réalisées en fonction des taux de panne par équipement et de l'importance de l'équipement sur le process. AMDEC utilisée pour définir la criticité.	Non. Les dernières analyses remontent à trois ans. Des AMDEC avaient été réalisées sur les deux parties de l'usine.	Analyse réalisée sur les 14000 actifs process, analyse allégée sur les 2000 actifs tertiaires. Analyse appliquée de puis 2ans sur la partie réseau. Mise à jour annuelle sur les équipements critiques. AMDEC utilisée en aval de l'analyse MERIDE pour définir la criticité.	Non. Pas de fréquence de mise à jour identifiée. Rq1: l'usine n'est pas exploitée telle que prévu lors de la conception. Rq2: des équipements « anciens » peuvent devenir critiques de par le coût ou la difficulté d'obtenir des pièces de rechanges.
	Comment se fait le choix de la mise en œuvre d'une telle étude? Qui les conduit ?	A partir de la fonctionnalité des installations.	Réalisée par les groupements dans le cadre des conception-réalisation.	Selon le taux de panne par équipement et de l'importance de l'équipement sur le process. Réalisée par le service méthode	Pas d'étude réalisée dernièrement mais la plus récente a été réalisée en impliquant les exploitants.	Via des sessions de travail entre le service méthode de maintenance et les équipes de maintenance.	Etudes réalisées au cas par cas selon les besoins. Accompagnement d'un prestataire extérieur encadré par le service méthode maintenance.
	Que fait-on de l'étude de criticité ensuite ?	Définition d'un plan d'action, sécurisation des installations des sites. Ciblage des efforts de maintenance sur les points faibles identifiés.	Etude non mise à jour.	Priorisation des travaux, gestion du stock des pièces de rechange et des modifications.	Reprise des plans de maintenance effectuée sur une partie de l'usine	C'est une donnée pour la définition des programmes de maintenance. Utilisée pour gérer les stocks et la durée de réapprovisionnement.	-
Maintenance conditionnelle	**De quels outils d'identifications des symptômes disposons-nous ?**	Pas encore mis en place.	Analyse d'huile, contrôle thermique (caméra thermique), analyse vibratoire sur quelques équipements (système SKF)	Heures de marche, contrôle de fonctionnement, contrôle de résultat, contrôle vibratoire récent. Analyse d'huile.	Caméra thermique utilisée, et analyse vibratoire sur seuil prévue.	Analyse vibratoire externalisée, thermographie, analyse d'huile. Interférométrie radar: prédictif à partir d'images satellites du site pour identifier les parties du réseau critiques.	Peu utilisée, mais réalisée avec des analyses vibratoires, d'ultrason, thermographiques. 2galement des mesures d'épaisseur et prise de temps d'ouverture.
	Quelles compétences sont attendues ?	-	Équipements acquis au fur et à mesure, et formations auprès des organismes de contrôle.	Capacité d'analyse des images thermiques (électricité notamment).	-	-	Besoin de formation spécifique sur les analyses vibratoires.

Thématiques	Questions	Direction des Réseaux	Seine Amont	Seine Aval	Seine Grésillons	Valenton	Seine Centre
GMAO et gestion documentaire	**Quelle utilisation de la GMAO est faite sur les sites ? Des règles spécifiques sont-elles définies ?**	Pas encore utilisé. Sujet sensible concernant les temps de transport.	Deux agents sont en charge des Demandes d'Intervention (DI) et des Compte Rendu d'Intervention (CRI) Permet le suivi et une vue d'ensemble des interventions. Temps d'intervention = Temps global	Analyse des pannes et de leur fréquence. Suivi fiche de vie des équipements Suivi des stocks Un fascicule de formation avec règle d'utilisation GMAO a été réalisé par les méthodes pour clarifier la procédure de DI.	Utilisée pour les CRI. Analyse pour identifier la sur-maintenance de certains équipements Règles non formalisées par écrit mais rappelées oralement aux agents Idée: pouvoir accéder à la GMAO depuis une tablette mobile.	C'est le seul et unique outil de travail pour suivre l'activité de maintenance. Il y a un guide d'utilisation qui précise tous les processus pour utiliser la GMAO.	La GMAO n'est pas complétée systématiquement et de façon homogène pour les temps d'intervention. Formation et guide d'utilisation simplifié.
	Est-ce que la GMAO est un outil d'aide à la décision? Comment motivez-vous les utilisateurs à saisir les données dans la GMAO?	- Formation et « éducation » des agents pour lever les freins dans la GMAO.	Apport de la GMAO sur la traçabilité des opérations. Travail sur des indicateurs d'astreintes à partir de la GMAO avec des plans d'amélioration qui en découlent.	La GMAO peut aider au suivi des actions, et à obtenir les informations, mais pas une aide à la décision sauf à créer des indicateurs de pilotage. Pb d'ergonomie de l'outil GMAO à améliorer.	Exploitation d'indicateurs ponctuels (OT curatifs en retard, OT réglementaire) qui servent d'aide à la décision. Utilisation de la GMAO imposée à raison de 20 à 30 min par jour.	Pour motiver les utilisateurs: indicateurs partagés, outil de planification permettant de visualiser les interventions de chacun, publication mensuelle du pourcentage de temps imputé, ce qui crée une émulation. Pas d'utilisation de tablette: problème atmosphère explosive et connectivité.	L'outil GMAO est perçu comme un outil d'achat et de gestion des stocks mais pas comme un outil de maintenance. Il est donc impossible de s'en servir comme outil d'aide à la décision. Pb. De saisies au niveau des temps d'intervention.
	Comment la mise à jour des plans est-elle gérée ?	Via une Gestion Electronique de Document (GED) technique	GED sous format Excel pour gérer les documents modifiables par les méthodes. Document accessibles par les agents sous format pdf. Les plans remis lors de la livraison des installations (DOE) ne sont pas mis à jour.	Plans mis à jour lors des interventions des entreprises	Une personne est en charge de la mise à jour des plans. Pas les moyens pour assurer le suivi global des modifications. Chaque agent a accès au fichier source.		Les plans sont mis à jour suite aux interventions des entreprises.
Préparation et Ordonnancement	**Comment sont organisés la planification et l'ordonnancement de la maintenance ?**	La maintenance établit les plannings et ensuite le bureau de maintenance et ordonnancement (BMO) vérifie et peut amender en fonction des contraintes d'exploitation. Priorisation par l'encadrement toujours en relation avec le BMO	Planification réalisée à partir de la GMAO et d'un fichier Excel pour les interventions des entreprises extérieures.	Planification réalisée par unité de production en lien avec les méthodes de maintenance qui intègrent les interventions dans la GMAO.	Planification gérée par un planificateur en lien avec les méthodes et à partir de la GMAO. La planification à la semaine est réalisée dans la GMAO.	Outil de planification développé par Eliade suite à un développement spécifique.	Réunion hebdomadaire au cours de la quelle est revu la planification et l'ordonnancement préparé par le service méthode. Pour les gros arrêts usine: préparation en amont avec recensement des travaux à réaliser Réunion exploitation/maintenance tous les 15 jours.
Asset Management	**Les coûts de maintenance, d'amortissement et d'investissement sont-ils connus de la part des responsables de patrimoine?**	Pas suffisamment	Non	Non, hors gestion locale L'amortissement des équipements n'est pas pris en compte dans la construction des budgets des sites	Pas aujourd'hui. Pas de projection sur plan d'investissement pluriannuel. Logique de maintenir les équipements pour les faire durer dans le temps.	-	Oui pour la gestion du bâti sauf amortissement. La direction se préoccupe des coûts d'amortissement sur les équipements critiques.
	Les directions opérationnelles réalisent-elles un inventaire physique de leur patrimoine ? Sur quel support est-il fait ?	Mise à jour à réaliser. L'outil « Guepars » permet de la faire la planification financière	Oui sur la GMAO sauf le bâti	Oui sur la GMAO	Oui sur la GMAO pour les équipements électromécaniques. Il manque un inventaire des ouvrages et bâti	Inventaire détaillé fait sur la GMAO	Inventaire physique pour le bâti Inventaire équipement dans la GMAO.
Indicateurs de maintenance	**Quels sont les indicateurs utilisés ? Quelle édition?**	Suivi des Ordres de Travaux (OT) et Demande d'Intervention (DI) Indicateurs classiques	Suivi du nombre d'OT non réalisés en fonction de la nature des interventions (préventif, correctif).	Indicateurs de maintenance issus de la GMAO.	Indicateurs intégrés dans la GMAO, mais pas d'indicateurs produit de manière systématique. Utiles: OT correctifs, le backlog, suivi du réglementaire.	Les indicateurs sont produits à partir de la GMAO. Zoom mensuel sur le correctif (type Pareto). Suivi du préventif avec le nombre d'OT réalisés. Analyse du correctif suivant le niveau de criticité. Suivi du contrôle réglementaire	Indicateurs de disponibilité des équipements définis en interne et présentés mensuellement à l'ensemble du service. Indicateurs utilisés surtout en pilotage
	Si des indicateurs communs à tous les sites devaient être mis en place, quels seraient vos attentes et points de vigilances ?	Prendre en compte les urgences Point de vigilance sur la définition de la disponibilité.	Taux de réalisation des OT	Besoin d'indicateurs de disponibilité des équipements. Revois les indicateurs en fonction de leur pertinence et de leur utilisation.	Avoir des indicateurs calculés sur les mêmes bases. Curatif, indisponibilité, retard OT. Définir des cibles communes Attention: éviter de comparer les sites.	-	Les modes de fonctionnement sont différents sur chaque site et donc difficile à mettre en commun. Les indicateurs génériques peuvent être mal exploités localement.

Annexe 7 – Liste des questions posées

Politique de maintenance

Budget et périmètre

- Quel est le périmètre de la maintenance? Quel est la délimitation entre maintenance process et tertiaire ?
- Quel est le budget de maintenance ?
- Comment le budget est-il élaboré ?
- Comment le budget est-il suivi ?
- Quelle est la ventilation des coûts ?

Management

- Quelles instances permettent la gestion de la fonction maintenance ? Qui participe ? Quelle périodicité ?
- Quel mode de reporting est utilisé : CR, plan d'action ? Fournir des exemples.
- Quel est le mode de diffusion des décisions de maintenance ?
- Management des équipes : Existe-t-il une politique de transmission du savoir ?

Politique de maintenance

- Des études de criticité ont-elles été réalisées ces deux dernières années ? Y a-t-il une périodicité ?
- Quel lien peut-on établir avec l'étude de danger, AMDEC ?
- Que fait-on de l'étude de criticité après ?
- Existe-t-il une politique de maintenance définie sur le site ?
- Quelles est la participation de services méthodes ?
- Quels sont les niveaux de maintenance ?
- Comment est organisée la planification et l'ordonnancement de la maintenance ?
- Quelle terminologie est utilisée dans la politique de maintenance (correctif, nature amélioration, réglementaire) ?
- Quel type de maintenance est utilisé ? systématique, conditionnel … ?
- Comment se répartissent les actions de maintenance entre réalisation en interne et prestations externes ?
- Comment sont gérés les contrôles réglementaires ?

Mutualisation et innovation

- Quelles sont les démarches de mutualisation en cours ?
- Y a-t-il un retour d'expérience ?
- Avez-vous identifié des tâches qui pourraient être mutualisées ?
- Quelles sont les attentes exprimées en termes de mutualisation?
- Innovation : Avez-vous identifié des logiciels ou de nouveaux outils numériques qu'il serait utile d'acquérir ? Pourquoi ?

Efficacité de la maintenance

Etat des lieux des pratiques de maintenance, analyse Pareto des coûts de maintenance, analyse des temps d'intervention

- Quelle utilisation de la GMAO est faite sur le site ? Quelles sont les moyens humains et les compétences existantes ? Des règles spécifiques ont-elles été écrites ? Quels sont les besoins ?
- Quels paramètres pourraient servir au calcul du coût, qu'est-ce qui pourrait le pondérer ? Quelles sont les limites, avantages identifiés vis-à-vis de ce coût ? Comment calculer le taux

horaire d'un employé ? Doit-on intégrer la notion d'improductif ? Où en est-on du rapprochement Coriolis - GMAO?

- Est-il nécessaire d'avoir des méthodes SIAAP qui harmoniseraient les pratiques de maintenance ? Comment cela pourrait-il être fait ?
- Comment motivez-vous les utilisateurs à saisir les données dans la GMAO ? Quels sont les freins ? Quelle exploitation est faite de ces informations ?
- Est-ce que la GMAO est un outil d'aide à la décision ? Si oui comment ? Si non pourquoi ?
- Comment sont remplis les temps d'intervention ? Temps prévu ? Temps réalisé ? Les données sont-elles utilisées ?

Redéfinition des besoins de maintenance basée sur la criticité, l'analyse RCM et le développement de la maintenance conditionnelle

- Comment se fait le choix de la mise en œuvre d'une étude de criticité ? Combien y-en-a-t-il sur le site ? Qui les conduit ? Comment est défini le périmètre de l'étude ?
- Y-a-t-il une corrélation entre maintenance et équipements critiques ? Avec quels outils, quelles compétences ?
- Y-a-t-il une réflexion au niveau du site sur les éléments qui alimentent la planification ? Quelles sont les données d'entrées ? Comment sont-elles priorisées, recueillies ?
- De quels outils d'identification des symptômes (analyse d'huile, analyse vibratoire…) disposons-nous ? Qui fait le choix de ces outils ? Comment est-il fait ? De quelle formation disposez-vous sur ce sujet ? Le site identifie-t-il des actions de maintenance conditionnelle ou prédictive? Quelles compétences sont attendues ?
- Comment est faite la politique d'obsolescence ? Avec quelles données (date d'installation, sollicitation…) ? Ces données sont-elles disponibles, fiables ? Quel lien peut-on établir avec la question des stocks ? (GT3)
- Est-il nécessaire de mettre en place une gestion du cycle de vie des équipements ?
- Les gammes de maintenance sont-elles revues ? Lors de l'état des lieux, comment se fait le choix des gammes à revoir ?
- De quelle manière la revue des gammes est-elle effectuée ? Par le contenu ? La fréquence ? En associant plusieurs gammes ?

Planification rigoureuse de la maintenance (y compris programmes pluriannuels)

- Serait-il nécessaire d'avoir des méthodes SIAAP ? Quels sont les outils utilisés pour mettre en évidence des co-activités (internes et externes) ? Quelles sont les modalités de gestion de ces co-activités ?
- Quel planning réaliser pour maitriser les interventions dans le périmètre des responsable d'unité, d'atelier, d'usine ? Comment mettre en place des Plan Pluriannuels d'Investissement ?
- Quelles sont les opérations courantes dont la préparation insuffisante génère une perte de temps et un surcroit de risque ?
- La création d'un cahier des charges type ne relève-t-elle pas davantage du domaine de la planification des interventions ? (GT4)
- Actuellement, de quelle manière les services réalisent leur planification ? Comment la criticité est-elle prise en compte, Quid des BT non réalisés ? Quel retour des services mutualisés, reprogrammation ?

Sécurité des interventions

- Comment se fait la sécurité des interventions ? De quelle manière s'organise-t-elle ?
- Comment est faite et gérée la mise à jour des plans ? Et si non pourquoi ?

- Comment est géré le suivi des modifications ? Avez-vous des personnes dédiées à cela ? Sur quel périmètre est-il effectué ? Quelles sont les limites, les outils développés, les pratiques ?
- Comment signalez-vous les chantiers de plusieurs jours ?
- Quand faut-il caler la gestion des modifications pour les sites non SEVESO ?

Définition et suivi des principaux indicateurs de maintenance

- Pourquoi définir des indicateurs de maintenance ? Pour qui ? Quels sont les indicateurs utilisés ? Quelle édition, quel traitement ? Fournir exemples.
- Quels sont les besoins éventuels ?
- Comment sont utilisés les indicateurs CARL? Quels sont leurs limites ?
- Si des indicateurs communs à tous les sites devaient être mis en place, quels seraient vos attentes et points de vigilance ?

Fiabilisation de la gestion documentaire et du suivi des modifications des plans techniques (coordination/centralisée)

- Comment la mise à jour des plans est-elle gérée et effectuée ? Qu'est-ce qui pourrait justifier que la mise à jour ne soit pas faite ?
- Votre/vos certification(s) impliquent-elles des obligations quant à la gestion documentaire ?
- Utilisez-vous des outils ou procédures pour la gestion documentaire ?
- Y-a-t-il des obligations dues au titre de la conformité réglementaire, des classements SEVESO, ICPE...?
- Comment s'effectue le suivi des modifications et les maj sur les différents documents (gammes, PID, DOE, DMLT, Manuel opérateurs...) ?

Fédérer exploitant/mainteneur sur des objectifs communs

- Que font les exploitants en matière de maintenance ? Quels outils utilisent-ils (matériels, et informatique, formation…) ?

Mutualisation des équipes

- Faut-il recenser les mutualisations possibles par site ? Quels peuvent en être les avantages, les inconvénients ? Quelles sont les attentes des sites ?
- Quelles tâches pourraient être mutualisées ? Quelles sont vos expériences de mutualisation ? Les avantages et limites ?
- Peut-on identifier des recoupements de compétences à l'échelle du SIAAP ? Si oui, lesquels ?
- Quelles conclusions/propositions pouvez-vous faire concernant la mutualisation des magasins ? Quels sont les avantages / les inconvénients ? Quels sont les surfaces utilisées ? Quelles sont celles disponibles ?
- Quelles sont vos attentes concernant l'établissement d'un tronc commun de formations techniques pour harmoniser les compétences ?

Recrutement et compétences

- Combien de temps faut-il, en moyenne, pour recruter un mainteneur ? En cas de problème de recrutement, est-ce lié à la spécialité et/ou aux conditions offertes par le SIAAP ?
- Combien de temps faut-il, en moyenne, pour recruter un mainteneur ?
- En cas de problème de recrutement, est-ce lié à la spécialité et/ou aux conditions offertes par le SIAAP ?

Gestion patrimoniale

Définition et valorisation du patrimoine SIAAP

- Les Directions Opérationnelles réalisent-elles un inventaire physique de leur patrimoine ? Sur quel support est-il fait ?
- Est-ce que les Directions Opérationnelles ont connaissance de l'inventaire comptable réalisé par la DAM ? Comment imaginent-elles les rapprocher ?
- Qui sont les responsables de patrimoine dans les directions opérationnelles ? Quel est leur périmètre ? Quelle est leur mission ? Comment se coordonnent-ils avec les responsables de production ?

Mise en place d'une politique de gestion patrimoniale

- Les marchés d'études sont-ils adaptés pour la définition des besoins et la rédaction des DCE ? Proposent-ils plusieurs solutions au problème posé ?
- Comment sont encadrées les opérations dans la phase étude et dans la phase travaux ? Les ressources et compétences sont-elles suffisamment présentes dans les Directions ?
- Quels sont les supports d'achats les plus utilisés pour réaliser le renouvellement du patrimoine ? Quelle est la répartition en % du budget entre ces différents supports ?
- Les coûts d'investissement, de maintenance et les amortissements sont-ils connus de la part des responsables de patrimoine ?
- A l'appui des fiches CDI 2016, quelles sont les simplifications et/ou compléments nécessaires dans le modèle de ces fiches ?
- N'est-il pas plus structurant et anticipatif de présenter des projets et de les échelonner sur plusieurs années que de présenter plusieurs fiches avec la même priorité ?
- Comment argumenteriez-vous les budgets GR face à un financier ?
- Pourquoi présenter des budgets GR, style « liste de course », sans argumentation autre que « c'est nécessaire, pourquoi en discuter ? » alors qu'une véritable gestion du patrimoine avec des coûts et amortissements donnerait de fait une transparence à la démarche ?
- Tout en gardant le rôle de Maîtrise d'Ouvrage, en quoi le fait de bénéficier de directions supports en assistance à exploitation, en ingénierie et en suivi de réalisation permettrait de mieux accompagner la définition des besoins, les études de conception et la formalisation des cahiers des charges et donc un suivi plus contractuel en maîtrise d'œuvre? Quelles sont les attentes des directions opérationnelles en ce sens ?
- Quels sont les besoins d'assistance en optimisation de la production et en gestion du patrimoine ?

Organisation des futurs projets neufs dans un contexte de fin de conception/Réalisation

- En quoi la maîtrise de la conception est impérative pour correctement réaliser un marché de travaux ?
- En quoi un support ingénierie centralisé permet de favoriser les standards et l'encadrement des BE externes spécialisés ?
- Quels méthodes et outils sont nécessaires pour cette organisation ?
- Qui doit assurer la Maîtrise d'Ouvrage dans ce mode de fonctionnement ?

Points critiques

- Quels sont d'après vous les points les plus critiques / problèmes non résolus impactant l'efficacité de la maintenance ? Classer par importance.

Idées et pistes de progrès

- Avez-vous à suggérer des idées / pistes de progrès concernant l'efficacité de la maintenance ?

Niveau de complétude		SEG	SAV		SEC			DDR		SAM			Niveau d'utilisation		SEG	SAV		SEC			DDR		SAM		
Niveau	Intervalle d'exhaustivité	Grés.	UPEI	UPBD	Colo.	Clic.	La Bri.	SERE	SERO	Valen.	Noisy	La Mor.	Point	Description	Grés.	UPEI	UPBD	Colo.	Clic.	La Bri.	SERE	SERO	Valen.	Noisy	La Mor.
Arborescence principale :																									
1	0%												1	Seuls les niveaux 7 et 8 sont déclarés comme point d'intervention		x									
2	0 - 30 %												1	La structure de l'arborescence est normée et respectée		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3	30 - 60 %												1	Les responsables se rapprochent volontairement des méthodes pour la création des nouveaux équipements	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
4	60 - 90 %									x			1	La disposition des codes analytiques a été revue suite au passage à CARL Source		x							x	x	x
5	90 - 100 %	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	1	L'arborescence est le point d'entrée des utilisateurs pour créer des DI / interventions	x	x	x	x	x	x	x	x			
Arborescence géographique :																									
1	0%								x				1	La codification est normée et permet d'effectuer des recoupements	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
2	0 - 30 %												1	On retrouve l'ensemble des TAGS dans l'arborecence géographique	x	x	x	x	x	x			x	x	x
3	30 - 60 %			x						x	x		1	L'arborescence géographique est construite sous la forme Dir./Site/UP/Bat./Etage/Local/TAG		x		x	x	x	x		x	x	x
4	60 - 90 %	x	x		x	x	x	x					1	Les codes des batiments sont connus des utilisateurs en dehors de la GMAO	x	x								x	x
5	90 - 100 %											x	1	La partie SIG est déployée ou a commencé à être déployée											
Matériels / Equipements :																									
1	0%												1	La codification des TAG est normée et fait l'objet d'une procédure	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	0 - 30 %									x			1	Des modèles sont associés aux unités mantenables de l'arborescence	x	x	x	x	x	x	x			x	x
3	30 - 60 %	x	x	x				x	x			x	1	Des fiches techniques sont liées aux équipements et/ou aux matériels		x	x	x	x	x				x	x
4	60 - 90 %										x		1	Un matériel est associé à chaque TAG/point de structure	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	90 - 100 %				x	x	x						1	Le n° série des matériels est renseigné pour chaque matériel											
DI :																									
1	0%												1	Le demandeur connait la notion de priorité et l'utilise à bon escient	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	0 - 30 %									x			1	La liste des "destinaires DI" est logique et connue de tous	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
3	30 - 60 %												1	La prise en compte d'une DI s'effectue dans des délais raisonnables (< 1 jour)		x	x	x						x	x
4	60 - 90 %					x	x						1	Les commentaires DI des créateurs sont suffisament fournis et précis	x	x	x	x	x	x			x	x	x
5	90 - 100 %	x	x	x	x			x	x		x	x	1	Les cases matériel "en panne" et "indisponible" sont cochées selon l'état de fait											
Intervention :																									
1	0%												1	Le tryptique symptôme/cause/remède est utilisé		x									
2	0 - 30 %												1	Une phase de préparation apparait sur le intervention (opération "PREPA", achats liés, respect de la validation									x	x	x
3	30 - 60 %												1	Les opérations sont utilisées et renseignées (détail de la gamme, temps de trajet, relevé mesure, tournée, ...)	x			x	x	x			x	x	x
4	60 - 90 %	x	x	x	x	x	x	x	x				1	Le commentaire/CR de l'intervenant est techniquement détaillée si l'intervention le justifie	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	90 - 100 %									x	x	x	1	La GMAO est la source du "à faire" (les responsables ouvrent l'outil le matin pour visualier le travail à réaliser)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Préventif :																									
1	0%												1	Le déclenchement par symptôme a déjà été mis en œuvre		x							x	x	x
2	0 - 30 %												1	Le relevé de compteurs supervision est automatisé et déclenche du préventif	x	x	x							x	
3	30 - 60 %									x			1	Les gammes font l'objet de révisions fréquentes	x			x	x	x	x	x	x	x	x
4	60 - 90 %	x	x	x				x	x		x	x	1	Une projection du préventif permet d'évaluer précisement les coûts à venir											
5	90 - 100 %				x	x	x						1	Des gammes standards sont mises à disposition pour les opérations courantes (à créer par duplication)	x			x	x	x					
Achats stock :																									
1	0%												1	Des achats d'articles sont parfois associés directement à des gammes	x						x	x		x	
2	0 - 30 %												1	Il n'y a pas d'achat "stock" passé en prestation "selon devis"	x	x	x				x	x	x	x	x
3	30 - 60 %												1	Les DA stocks sont générées par le module de réapprovisionnement		x	x	x	x	x			x	x	x
4	60 - 90 %		x	x				x	x	x		x	1	Le format du "bon de commande" CARL Source est utilisé et transmis au titulaire	x	x	x				x	x	x	x	x
5	90 - 100 %	x			x	x	x				x		1	Le service comptabilité est intégré au processus pour valider les DA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Achats prestation :																									
1	0%				x	x	x						1	Des achats de prestations sont parfois associés directement à des gammes	x	x	x				x	x		x	
2	0 - 30 %												1	Le périmètre fonctionnel concerné par l'intégration des DA dans la GMAO est clairement définit	x						x	x	x	x	x
3	30 - 60 %												1	Le devis est joint à la DA en tant que document associé							x	x			
4	60 - 90 %												1	Le format du "bon de commande" CARL Source est utilisé et transmis au titulaire	x	x	x				x	x	x	x	x
5	90 - 100 %	x	x	x				x	x	x	x	x	1	Le service comptabilité est intégré au processus pour valider les DA	x	x	x				x	x	x	x	x
Gestion des stocks :																									
1	0%												1	Les matériels sont également gérés en stocks		x	x						x	x	x
2	0 - 30 %												1	Le calcul de la valorisation des stocks s'effectue sans difficultés depuis CARL (inventaire OK, Comptes budgétaires renseignés, Révision des PMP, ...)	x	x	x				x	x	x	x	x
3	30 - 60 %							x	x				1	Le renseignement des stocks mini/maxi est cohérent et fait l'objet d'une procédure	x			x	x	x				x	
4	60 - 90 %	x	x	x						x	x	x	1	La réservation d'article est intégrée et fonctionne correctement	x	x	x							x	
5	90 - 100 %				x	x	x						1	Utilisation de paramètres de stockage avancés (péremption, stock de sécurité,...)		x	x								
Administration :																									
1	0%												1	Les demandes d'assistances (notamment d'information) sont traitées par les méthodes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2	0 - 30 %												1	Le service méthode gère la planification des interventions	x			x	x	x	x	x	x	x	x
3	30 - 60 %												1	Le service méthode gère la création des filtres particuliers et des rapports d'édition							x	x	x	x	x
4	60 - 90 %		x	x									1	Le service méthode utilise les données de la GMAO à des fins de maintenance (AMDEC, etc...)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
5	90 - 100 %	x			x	x	x	x	x	x	x	x	1	Le service méthode génère un reporting (indicateurs, TdB) à destination des responsables / de la direction	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Annexe 9 – Illustration et justification de l'apport du rôle de préparateur selon (Palmer, 2013)

Pour justifier l'augmentation de la productivité des employés de 57 % grâce à la mise en œuvre du rôle de préparateur, (Palmer, 2013) prend l'exemple d'une équipe composée de trois techniciens.

Dans le premier cas, trois techniciens – sans préparateur - réalisent des opérations de maintenance. Ici, le niveau de « Wrench time » de chaque personne n'est pas optimisé (nous supposerons qu'il correspond à 35%) ; par conséquent, le niveau de productivité globale de l'équipe est de 3 x 35 % = 105 %.

Dans le deuxième cas, avec un préparateur et deux techniciens, le « wrench time » du préparateur est nul puisqu'il n'intervient pas sur les équipements. En revanche, celui des deux techniciens passe à 55 % grâce aux actions du préparateur. De ce fait, le niveau de productivité globale de l'équipe atteint 1 x 0 % + 2 x 55% = 110 %.

En jouant sur ce rapport de 55 % / 35 % nous améliorons dans l'absolu la productivité des employés de 57 %. Selon le retour d'expérience de (Palmer, 2013), un préparateur peut gérer les activités de maintenance de 20 à 30 techniciens. En prenant l'hypothèse haute, la mise en place d'un préparateur pour une équipe de 30 techniciens permet d'obtenir un niveau de productivité équivalent à 47 techniciens.

Annexe 10 – Méthodologie d'évaluation de la criticité mise en place au SIAAP

Matrice de cotation		Note			
		0	1	2	3
Critères	P	Nuisances externes sans impact sur l'exploitation (ER 10)	Impact sur les conditions d'exploitation (ER5, 6,7)	Impact sur le milieu naturel (ER3 et ER4) et/ou sur les utilités (ER8) et/ou le contrôle commande (ER9)	Impact direct sur la sécurité des personnes (ER1) et/ou l'intégrité des équipements (ER2)
	I	Pas d'impact sur le process (redondance installée)	Faible impact sur le process (moyens de secours mobilisables facilement)	Impact mesurable sur une partie du process	Impact significatif sur l'ensemble du process
	E	< 10 k€	> 10 k€ < 100 k€	> 100 k€ < 250 k€	> 250 k€
	U	< 25 %	> 25 % < 50 %	> 50 % < 75 %	> 75 %

N°ER	Signification
1	Mise en cause de la sécurité des personnes (blessure grave ou mort)
2	Mise en cause de l'intégrité des équipements en lien avec un dommage lié au procédé ou à un effet externe dont inondation totale ou partielle des installations
3	Rejet hors normes en deçà des valeurs rédhibitoires
4	Déversement en Seine
5	Dégradation du traitement des produits et sous-produits
6	Dégradation des fonctions ventilation / désodorisation
7	Dégradation des conditions d'exploitation
8	Dégradation des alimentations énergétiques
9	Dysfonctionnement du système de contrôle-commande
10	Nuisances occasionnées sur le voisinage

Le calcul de la criticité « CR » se calcule comme suit : **CR = P+I+E+U**
Nous distinguons trois niveaux de criticité :

- Critique
  - $8 < CR \leq 12$
  - ou P=3 ou I=3
- Important :
  - $4 < CR \leq 8$
- Secondaire :
  - $0 < CR \leq 4$

Annexe 11 – RACI clarifiant le rôle du préparateur sur le service 2 de l'usine SAV

		ACTIONS	Pilote la préparation	Responsable d'équipe maintenance / Chargé d'opération	Responsable d'équipe exploitation	Responsable du Magasin	Acheteur	Service Méthodes de maintenance	Service Production
Etat 0	Intervention "En Préparation"	Vérifier les besoins et répartie en fonction de :	R					I	
		1. Disponibilité Pièces détachées							
		2. Demande d'Achat Fourniture							
		3. Demande d'Achat Service (Sous-traitant)							
		4. Plan de prévention							
		5. Demande d'Arrêt d'Ouvrage (DAO)							
		6. Mise à disposition (MAD)							
		7. Permis de feu / contrôle d'atmosphère délivré par le Service de prévention et gestion des risques							
		8. Consignation par le Service Electricité et Automatisme (SEA)							
		9. Outils spécifiques							
		10. Engin de levage manutention interne							
		11. Manutention mutualisée (Manitou)							
Etat 1	Intervention en "Attente validation" ou "Attente devis"	1. Vérifier Disponibilité Pièces détachées	R	**C**		C		I	
		2. Lancer Demande d'Achat Fourniture	I	C		R			
		3. Lancer Demande d'Achat Service (Sous-traitant)	I	R					
		4. Rédiger Plan de prévention / Analyse de risque "en régie" formalisée papier si besoin	I	R					C
		5. Répondre au Triangle du PEUX	I	R					
		6. Rédiger DAO	I	R	C				A
		7. Rédiger Mise à disposition (MAD) si besoin	I	C	R			C	C
		8. Informer du besoin de Permis de feu / contrôle d'atmosphère (SPGR)	R	I					
		9. Informer du besoin de Consignation par SEA	R	I					
		10. Préparer Outils spécifiques	I	R					
		11. Préparer Engin de levage manutention interne	I	R					
		12. Rédiger la demande pour Manutention mutualisée (Manitou)	I	R					
Etat 2	Intervention en "A planifier"	Si étape 1 à 12 validées alors Intervention passée en "Validée"	R						

Annexe 12 – Missions et Format de chaque comité

	COMEX	CDD	Comité d'Exploitation (CE)
Missions	▪ Mise en œuvre des décisions du conseil d'administration ▪ Application des orientations définies par le CDD ▪ Arbitrage des événements qui rythment la vie du SIAAP et des décisions majeures ▪ Validation des budgets et du cadre financier ▪ Suivi des objectifs des directions	▪ Orientations stratégiques ▪ Partage d'informations entre DG, DGA et Directeurs ▪ Impulsion sur les sujets nouveaux ou à relancer ▪ Détermination des sujets nécessitant une réflexion collective et devant être traités en séminaire	▪ Coordination de l'Exploitation (production et maintenance) ▪ Arbitrages sur les options d'exploitation ▪ Planification des actions structurantes sur un horizon de 1 mois à 3 ans ▪ Suivi du calendrier budgétaire ▪ Gestion des risques d'exploitation et respect des obligations réglementaires
Lien SIAAP 2030	▪ Pilotage global de la phase 3 ▪ Suivi de l'atteinte des objectifs des 4 axes (4 comités) ▪ Priorisation et facilitation ▪ Organisation de la communication	▪ Suivi du déroulement du Plan Stratégique ▪ Facilitation de la mise en œuvre du projet ▪ Impulsion sur des sujets nouveaux	▪ Revue d'avancement des actions pour atteindre les 10 objectifs de l'axe 1 ▪ Arbitrages et priorisation ▪ Arbitrage sur les sujets à traiter dans les réseaux métiers
Agenda	▪ Réunions hebdomadaires	▪ Réunions tous les 2 mois	▪ Réunions toutes les 2 semaines
Participants (hors secrétaire)	▪ DG, DGAs, Directeur de SAV (représente le CE), DAM, DRH, DCRI, IG (mission sécurité)	▪ DG, DGAs, Directeurs, IG, Chargés de Missions. ▪ Directeurs adjoints en replac[t].	▪ DG, Directeurs opérationnels, DAM, DLE + représentants de la DT, DAC, IG, DI, C3P, CRH, CGR* ▪ Directeurs adjoints en replac[t]

	Comité Prospective, Patrimoine et Partenariats (C3P)	Comité Ressources Humaines (CRH)	Comité Gestion des Risques (CGR)
Missions	▪ Pilotage du processus innovation en lien avec la DI, la DT, la DST et les exploitants ▪ Animation de la politique patrimoniale ▪ Pilotage des schémas directeurs, PEI et PPI (C3P consultatif pour le PPI)	▪ Elaboration de la stratégie RH à présenter au Comité de Direction ▪ Plan d'accompagnement des managers (cadre et outils communs, plan d'accompagnement, réseaux, …) ▪ Mise en œuvre de processus RH communs (recrutement, formation, etc.) ▪ Parangonnages	▪ Elaboration et mise en place du système de management des risques ▪ Revue trimestrielle des risques par Direction ▪ Pilotage de l'axe 4 : Mise en place des actions en lien avec les objectifs de l'axe 4, Suivi d'avancement.
Lien SIAAP 2030	▪ Le C3P est le comité stratégique du projet PEI : ▪ Nomination de l'équipe projet et suivi d'avancement du PEI ▪ Coordination et arbitrage sur le PEI	▪ Mise en œuvre des actions de l'axe 3, soit en 2020 : ▪ Guide du manager du SIAAP ▪ Mise œuvre d'un processus unique de recrutement ▪ Animation et coaching	▪ Coordination des missions décrites ci-dessus en lien avec les exploitants, les directions fonctionnelles et les autres axes de SIAAP 2030
Agenda	▪ Réunions mensuelles	▪ Réunions tous les 2 mois	▪ Réunions mensuelles
Participants (hors secrétaire)	▪ DGAP, DT, DST, DI, DAM, représentant du CE, chef de projet PEI + représentant du CRH, CGR *	▪ DRH, un représentant de chacun des 3 comités (issu du Groupe de Travail de l'Axe 3) + le directeur de la DCRI	▪ IG, DAC, DRH, DAM, DT (qui représente le C3P) + un représentant du CE

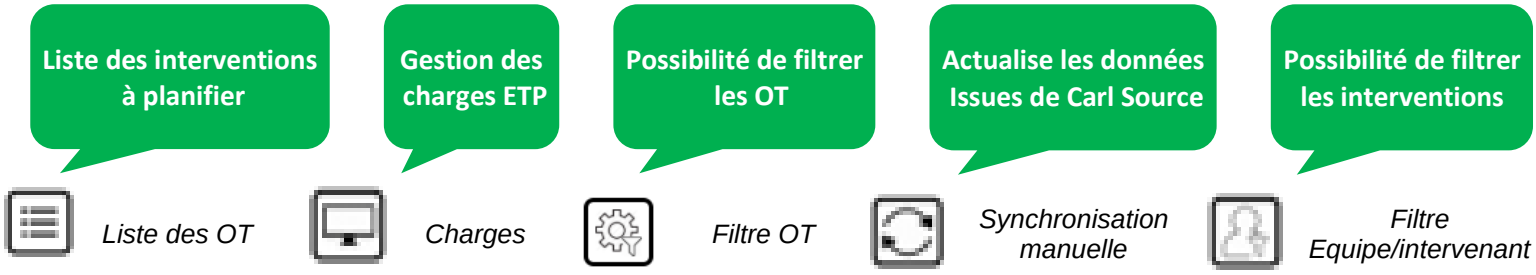
* en fonction de l'ordre du jour

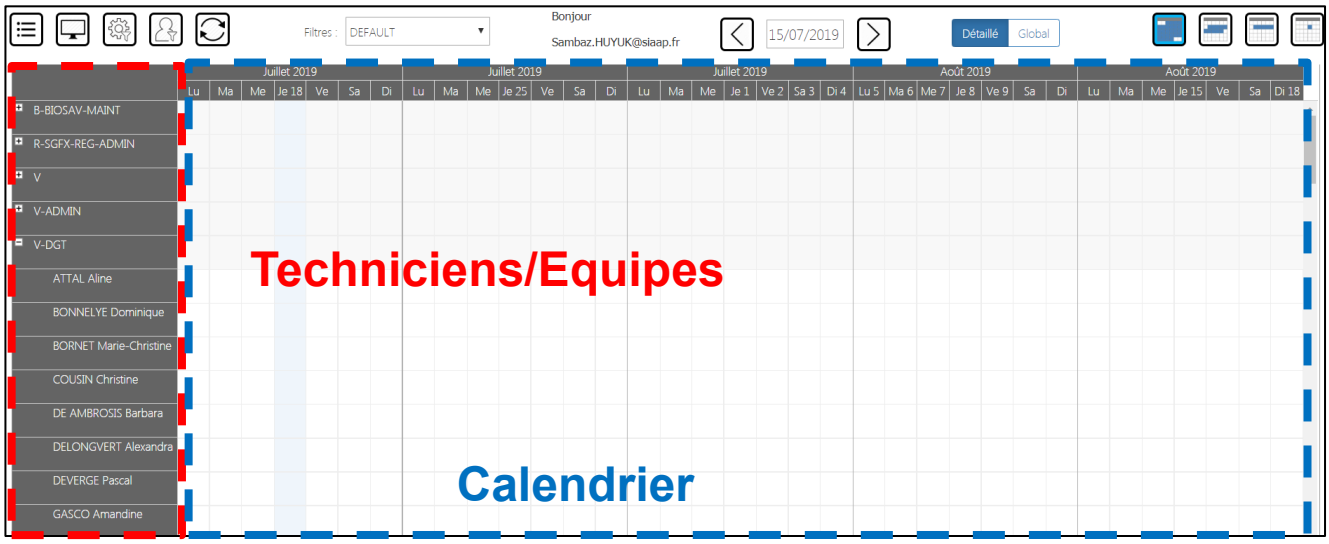
Annexe 13 – Extrait du fichier de planification utilisé sur l'usine SEC

N°	*21-0007*
Process	*PRETRAITEMENT*
Niveau-Zone-Salle	*C-N25-ZA3-S07*
TAG	*CO-1B-SG-2100*
Libellé	*DEGRILLEUR 30MM*
Service + Nom chargé d'opération	*C-COLO-METHODES CJB*[24]
Libellé Opération	*Maintenance améliorative*
Description opération	*Remplacement des dégrilleurs*
Titulaire / SIAAP	*AXEAU/INDUSTRELEC/MS PLASTIC*
Impact sur la capacité de traitement	*NON*
Date de Mise à Disponibilité	*30/11/2020*
Date de fin de mise à disposition	*29/01/2021*
Besoin d'intervention du Service Programmation et Prévention	*Permis de feu*
Consignation	*Exploitation/Electrique/mécanique*
Date de consignation	*30/11/2020*
Date d'intervention initiale	*04/01/2021*
Durée d'intervention	*5 jours*
N° OT associé	*19OT060075*
Terminé OUI/NON	*OUI*
N° semaine	*1*
Numéro de Plan de Prévention	*017/2021*
Motif de refus	-

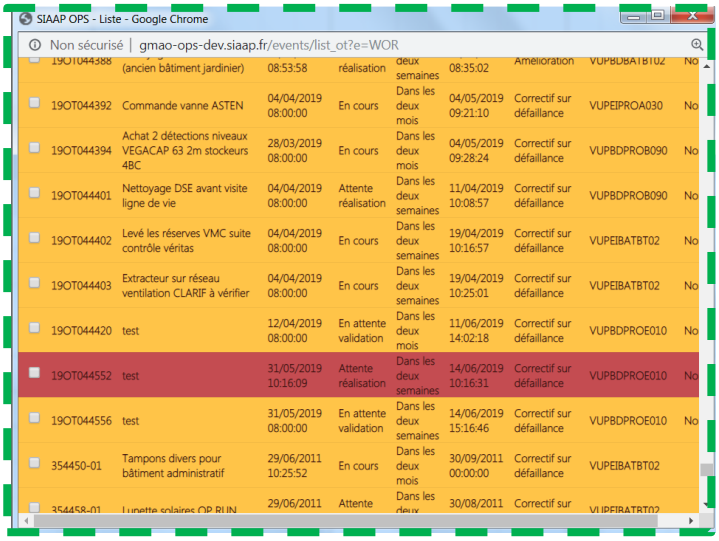
[24] Le nom a été remplacé par les initiales du chargé d'opération

Annexe 14 – Principales fonctionnalités de l'Outil de Planification du SIAAP - OPS

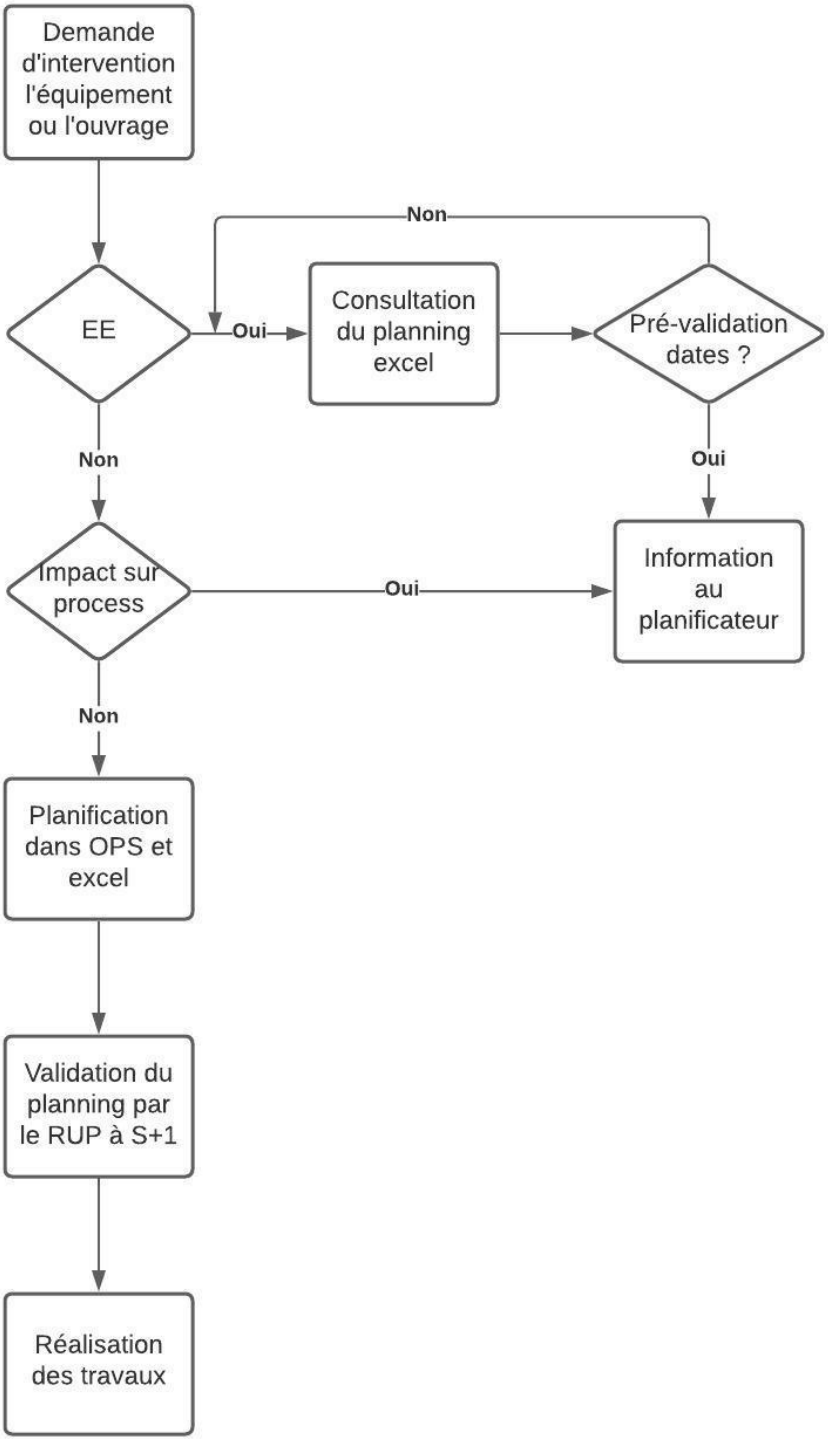




Liste des OT



Annexe 15 – Procédure de planification pour la direction opérationnelle Seine Amont



EE : Entreprise Extérieure
RUP : Responsable Unité Process

Annexe 16 – Objectifs et missions des réseaux métiers maintenance

▪ *Réseau métier « Pilotage de la maintenance »*

Objectifs :

- **Optimiser la maintenance en tenant compte des enjeux stratégiques du SIAAP**

Missions :

- **Harmoniser la politique de maintenance à travers les outils et les pratiques et la faire vivre dans le respect des objectifs** *(Action 26)*
  - Mise à jour du manuel de maintenance
  - Constitution des formations maintenance
- **Mettre en œuvre la stratégie d'achat en lien avec les activités de la maintenance**
  - Infuser la nouvelle politique achats dans les directions opérationnelles pour réaliser les objectifs de SIAAP 2030
- **Définir les fonctions de la maintenance à centraliser et les mettre en place** *(Action 27)*
- **Définir et suivre des indicateurs de pilotage de la maintenance** *(Action 29)*
- **Garantir la réussite des autres réseaux métier de la maintenance**
  - Suivi régulier de l'avancement par rapport aux objectifs
  - Mise à disposition des ressources nécessaires
- **Partager et communiquer les bonnes pratiques à l'ensemble du SIAAP**
  - Benchmark avec nos partenaires identifiés et d'autres secteurs d'activité
  - Favoriser la transversalité et la généralisation des bonnes pratiques de maintenance

▪ *Réseau métier « Internalisation et Mutualisation »*

Objectifs :

- **Réduire les coûts de maintenance externalisées et monter en compétence des employés**

Missions :

- **Évaluer le potentiel d'internalisation** *(Action 36)*
- **Internaliser des prestations (conformément au logigramme du manuel de maintenance)**
- **Réviser les cahiers des charges de maintenance sous-traitée en lien avec le périmètre de l'OCI en définissant le juste besoin et contrôler les prestations avec les opérationnels en lien avec les actions 46, 47, 48.**
  - Optimiser davantage les principaux contrats pour la maintenance (Action 47)
  - Optimiser les marchés maintenance électromécanique (Action 48)
  - Améliorer l'utilisation et le pilotage de l'exécution des marchés (Action 46)

▪ *Réseau métier « Préparation et Planification »*

Objectifs :

- **Faciliter la mise en place pérenne du processus préparation-planification avec l'Outil de Planification du SIAAP**

Missions :

- **Accompagner les sites dans la mise en œuvre du processus de préparation/planification**
- **Recenser les besoins en formation pour le logiciel OPS**

- ***Réseau métier « Maintenance conditionnelle »***

Objectifs :

- **Généraliser l'analyse vibratoire à l'ensemble des machines tournantes (horizon 1-2 ans) puis continuer de développer les autres applications**

Missions :

- **Définir le périmètre de l'analyse vibratoire, thermographie, mesure diélectrique, analyse d'huile etc.**
- **Développer et harmoniser les compétences et les outils à l'échelle du SIAAP**
  - Surveiller en continu de certains équipements (vibration, température, ...)
  - Maîtriser d'outil de traitement de données (du collecteur au logiciel de suivi)
  - Analyser et interpréter les données
- **Définir et mettre en œuvre (à l'échelle d'un POC) la politique de maintenance prévisionnelle (suivi de paramètre d'exploitation, IoT, IA etc.)**

- ***Réseau métier « Club utilisateur GMAO »***

Objectifs :

- **Harmoniser l'utilisation de la GMAO sur l'ensemble des directions du SIAAP**

Missions :

- **Recueillir les besoins des utilisateurs et proposer des solutions standard**
- **Faire évoluer la GMAO pour répondre aux besoins des utilisateurs**
  - Montée de version
  - Ajout de nouvelles fonctionnalités (OPS, e-c@t[25])
- **Analyser les Indicateurs de remplissage de la GMAO**

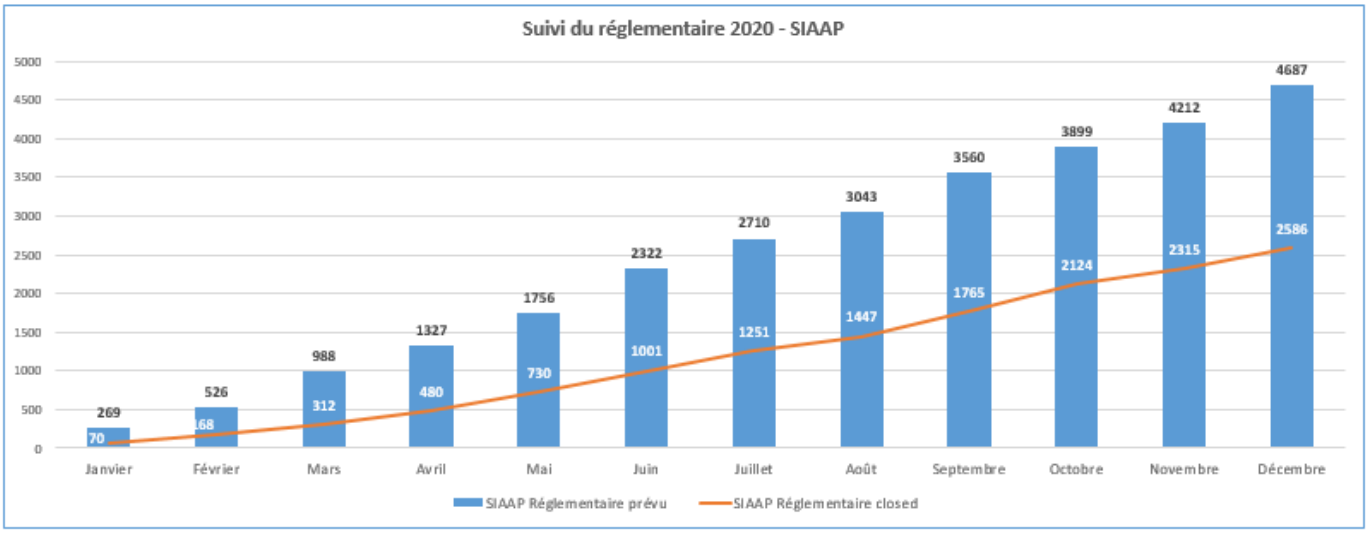
[25] E-c@t est catalogue électronique regroupant les références internes des fabricants de pièces détachées. Ce catalogue est porté par l'Association Française Ingénieurs et Responsables de Maintenance – AFIM.

Annexe 17 – Indicateurs de pilotage de la maintenance et leur périmètre associé

- ***Indicateur I.***

Périmètre:

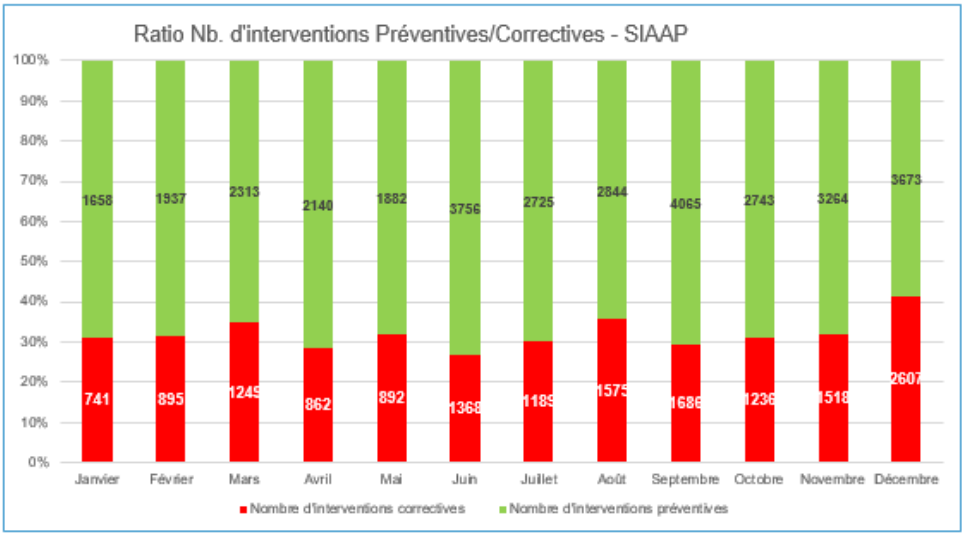
- Interventions de nature « *Préventif contrôle réglementaire* »
- Interventions avec « *date de fin souhaitée* » comprise entre le 1er janvier 2020 et la fin du mois considéré
- Interventions « *soldée* » *sur la période considérée*

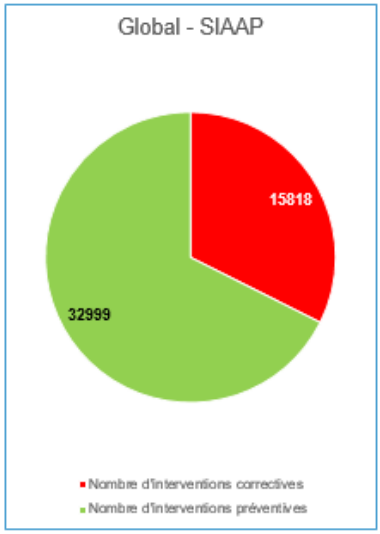


- ***Indicateur II.***

Périmètre:

- Interventions « *closed* » entre le 01/01/20 et le 31/12/20
- Considérées comme Correctives:
  - Correctif sur défaillance
- Considérées comme Préventives:
  - Préventif conditionnel / prévisionnel
  - Préventif systématique

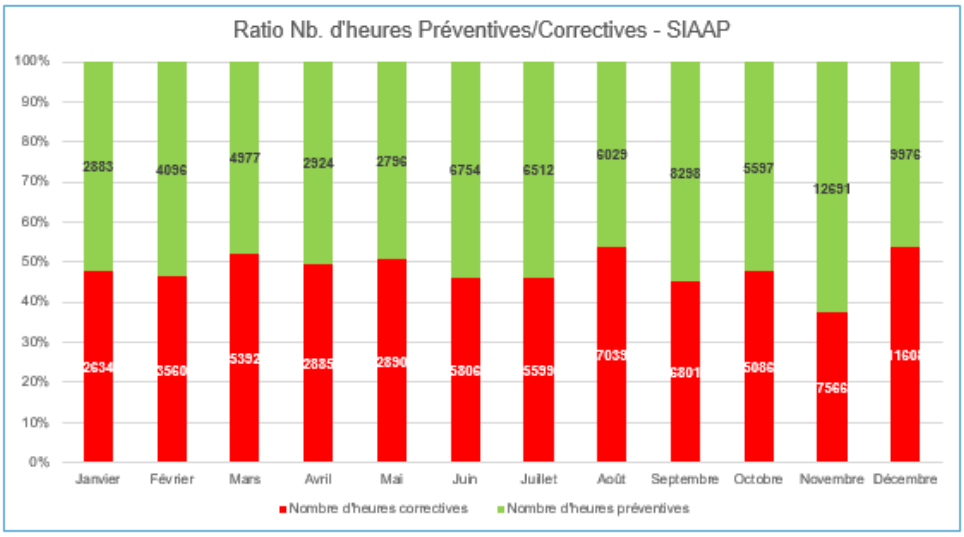


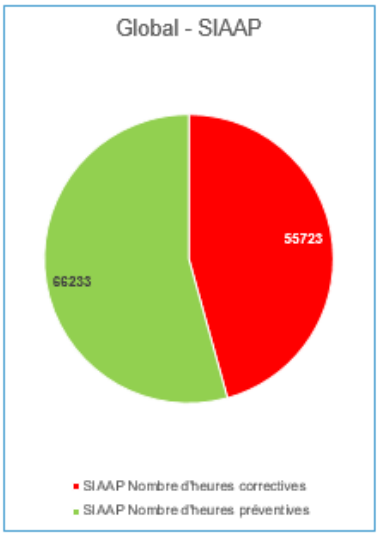


▪ *Indicateur III.*

Périmètre:

- Interventions « *closed* » entre le 01/01/20 et le 31/12/20
- Considérées comme Correctives:
  - Correctif sur défaillance
- Considérées comme Préventives:
  - Préventif conditionnel / prévisionnel
  - Préventif systématique

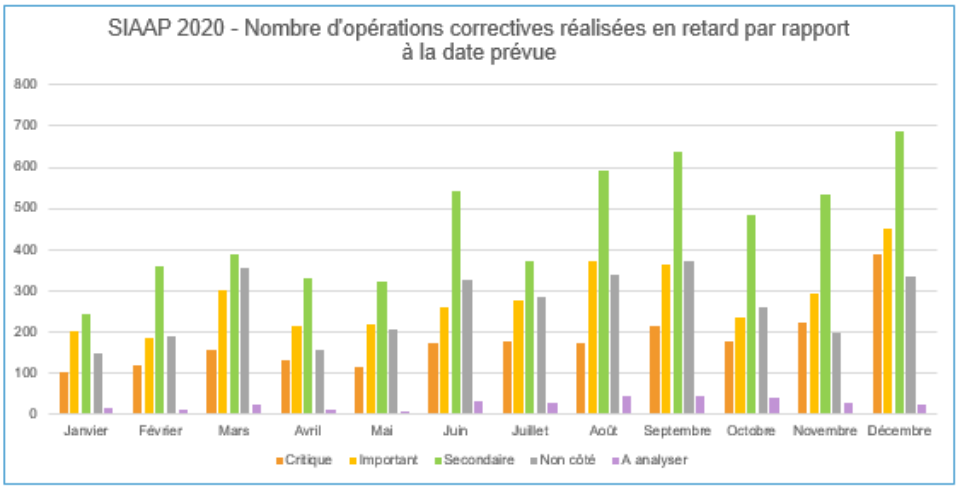


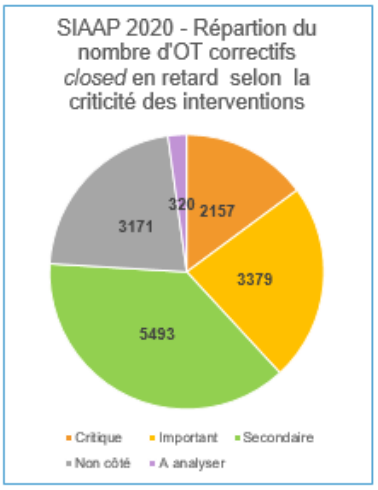


▪ *Indicateur IV.*

Périmètre:

- Interventions « *closed* » entre le 01/01/20 et le 31/12/20
- OT avec date de priorité dépassée
- Répartition selon les états de la criticité:
  - Critique
  - Important
  - Secondaire
  - Non côté
  - A analyser



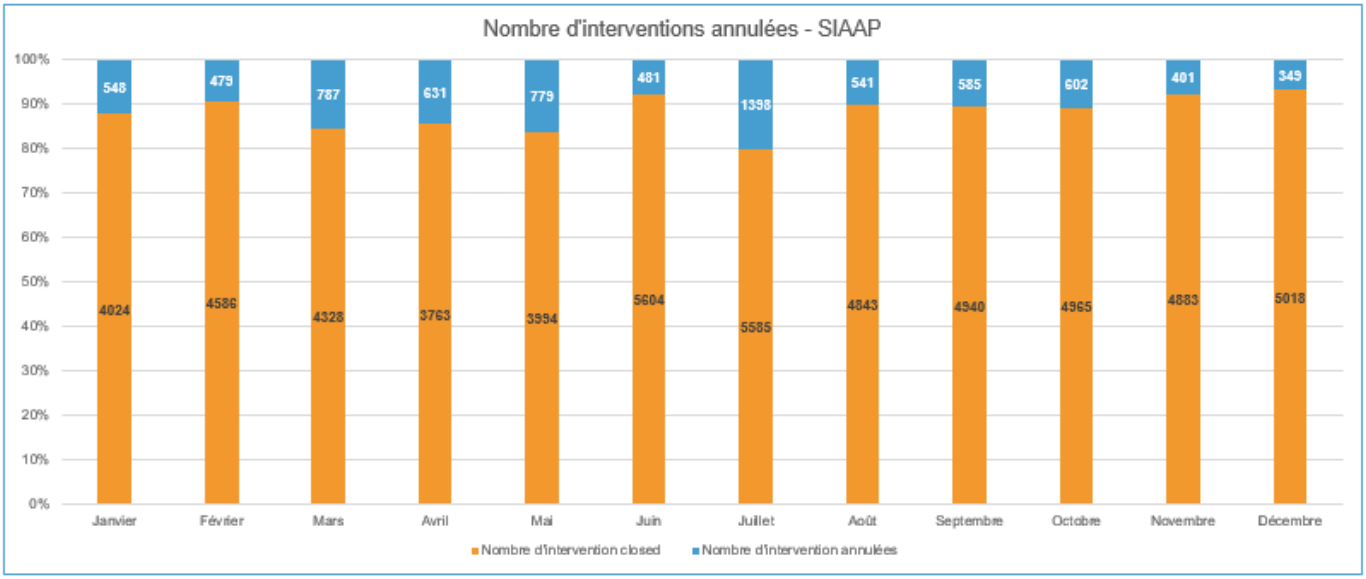


- ***Indicateur V.***

Périmètre:

- Les interventions *cancelled* sur le mois
- Les interventions *closed* sur le mois

Attention: sensibiliser les agents pour qu'ils renseignent « annulé » au lieu de « soldé-non réalisé »



- ***Indicateur VI.*** $\frac{\textit{Nombre d'OT réalisés sur la semaine ayant été préparés}}{\textit{Nombre d'OT réalisés sur la semaine}}$

Périmètre numérateur:

- Interventions ***'terminé'*** et/ou ***'soldé'***
- '***date de changement d'état***' comprise entre le début et la fin de la semaine

Périmètre dénominateur:

- Interventions ***'terminé'*** et/ou ***'soldé'***

- ***Indicateur VII.*** $\frac{\textit{Nombre d'OT planifiés et réalisés sur la semaine}}{\textit{Nombre d'OT réalisés sur la semaine}}$

Périmètre numérateur:

- Interventions à l'état '***attente réalisation***' ou ***'en cours'***
- Intervention avec dans l'onglet main d'œuvre, le texte '**application planning**' renseigné en commentaire
- Interventions avec '***date de planification main d'œuvre'*** *comprise entre le début et la fin de la semaine*
- Interventions ***'terminé'*** et / ou ***'soldé'***

Périmètre dénominateur:

- Interventions ***'terminé'*** et / ou ***'soldé'***

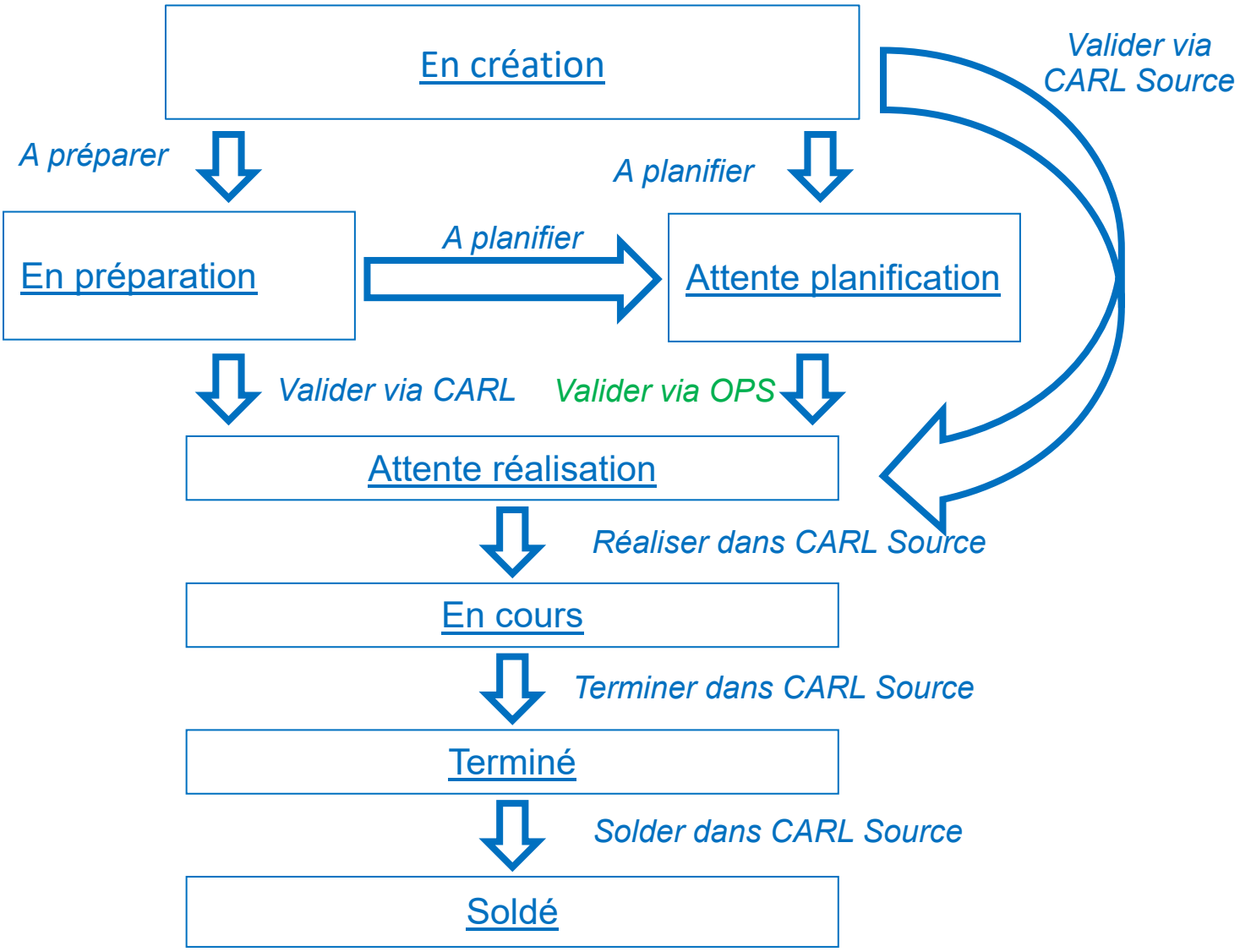
- ***Indicateur VIII.*** $\frac{\textit{Nombre d'OT planifiés et réalisés sur la semaine}}{\textit{Nombre d'OT planifiés sur la semaine}}$

Périmètre dénominateur:	Périmètre numérateur:
• Interventions à l'état '***attente réalisation***' ou '***en cours***' • Intervention avec dans l'onglet main d'œuvre, le texte '**application planning**' renseigné en commentaire • Interventions avec '***date de planification main d'œuvre***' *comprise entre le début et la fin de la semaine*	• Périmètre dénominateur • Interventions '***terminé***' et / ou '***soldé***'

Les trois indicateurs sont produits de manière hebdomadaire à partir de données de la GMAO depuis le mois d'avril 2021. Le tableau ci-dessous regroupe les données pour la première semaine du mois de mai 2021 (semaine18).

# Semaine	Direction opérationnelle	OT planifiés	OT planifiés et réalisés	OT réalisés	OT réalisés ayant été préparés	***Indicateur VI***	***Indicateur VII***	***Indicateur VIII***
18	DSAR	0	0	118	0	**0%**	**0%**	**-**
18	SAM	101	69	867	2	**0%**	**8%**	**68%**
18	SAV	2	2	955	16	**2%**	**0%**	**100%**
18	SEC	0	0	853	2	**0%**	**0%**	**-**
18	SEG	1	0	98	0	**0%**	**0%**	**0%**
18	SIVAL	71	31	367	14	**4%**	**8%**	**44%**

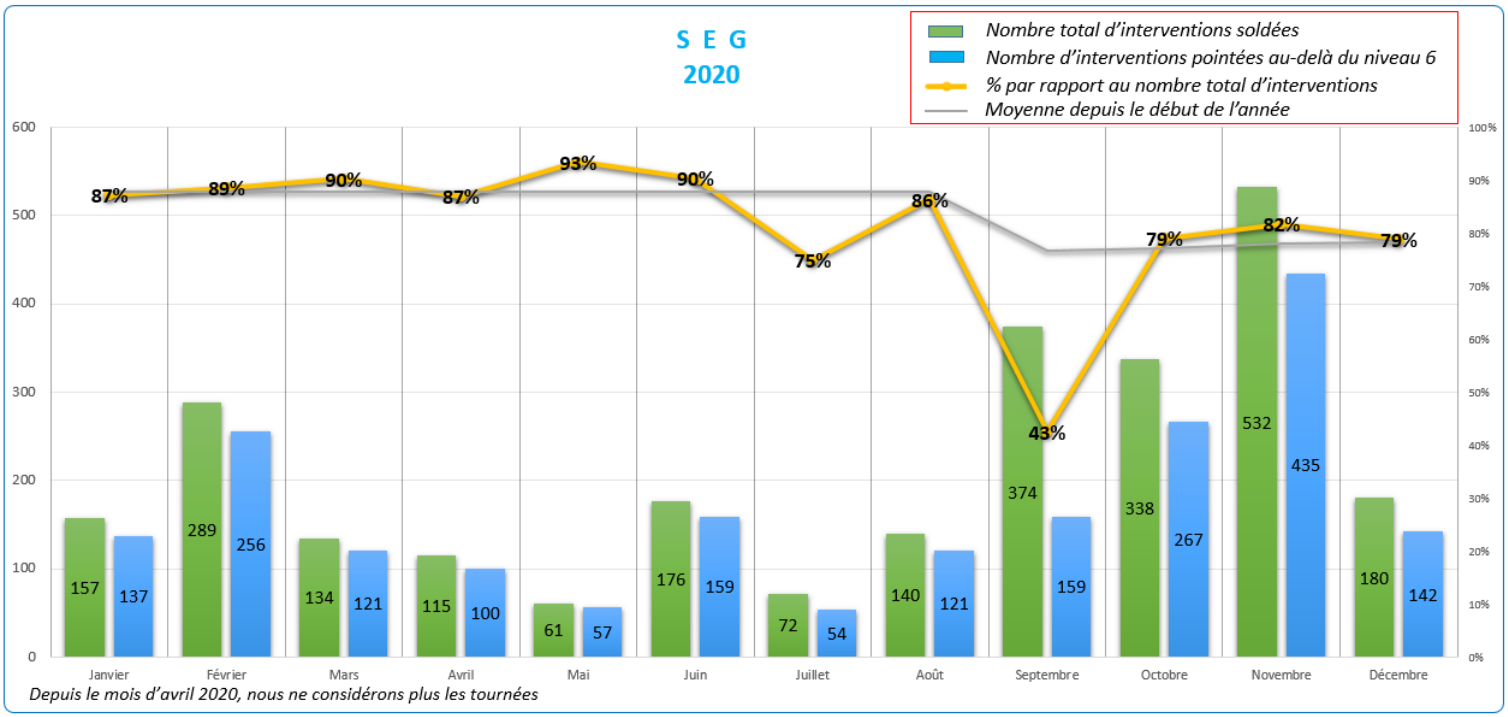
Annexe 18 – schéma des différents états d'un Ordre de Travail dans la GMAO.



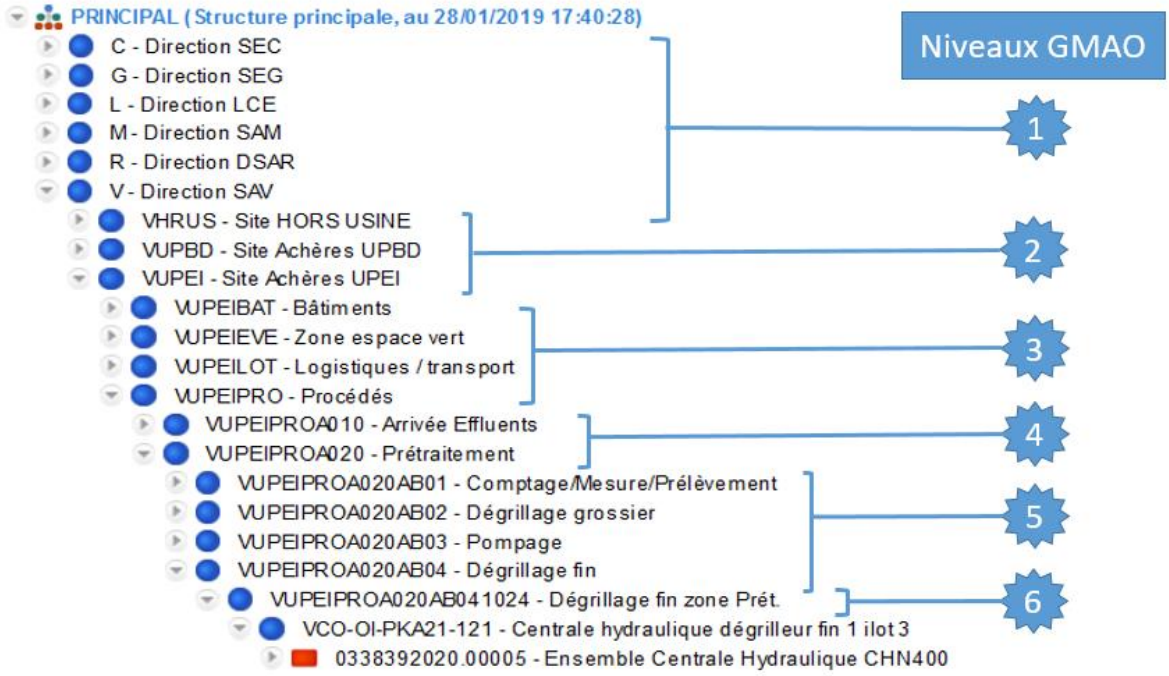
Annexe 19 – Indicateurs de remplissage de la GMAO et leur périmètre associé

- ***Indicateur 1.*** ***Répartition du nombre d'intervention par niveaux dans la GMAO***

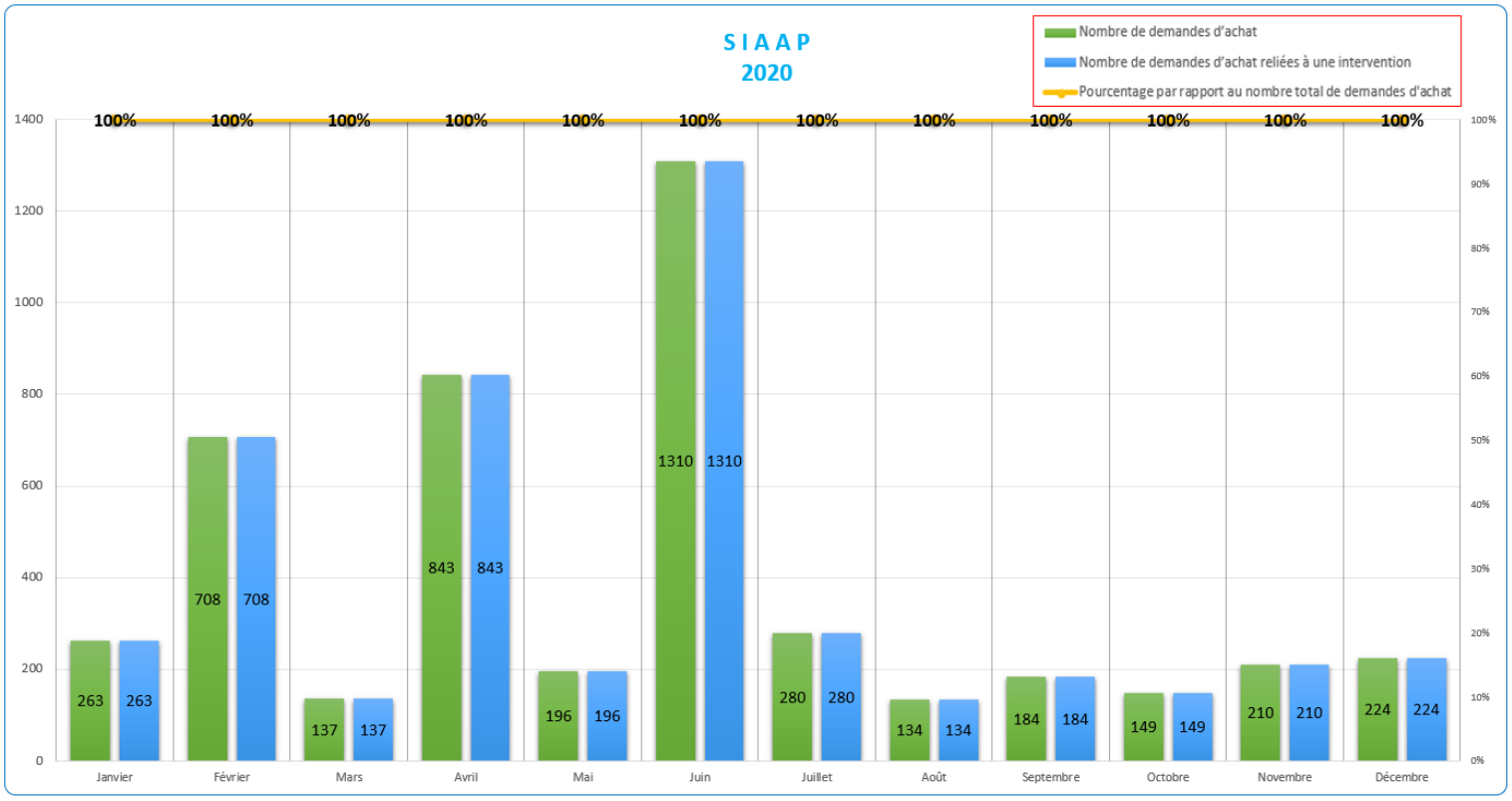
Cet indicateur est spécifique à chaque direction opérationnelle mais le principe est identique. En fonction de leur arborescence en GMAO, nous considérons différents niveaux. Ici nous présentons les valeurs pour l'usine de Seine Grésillons



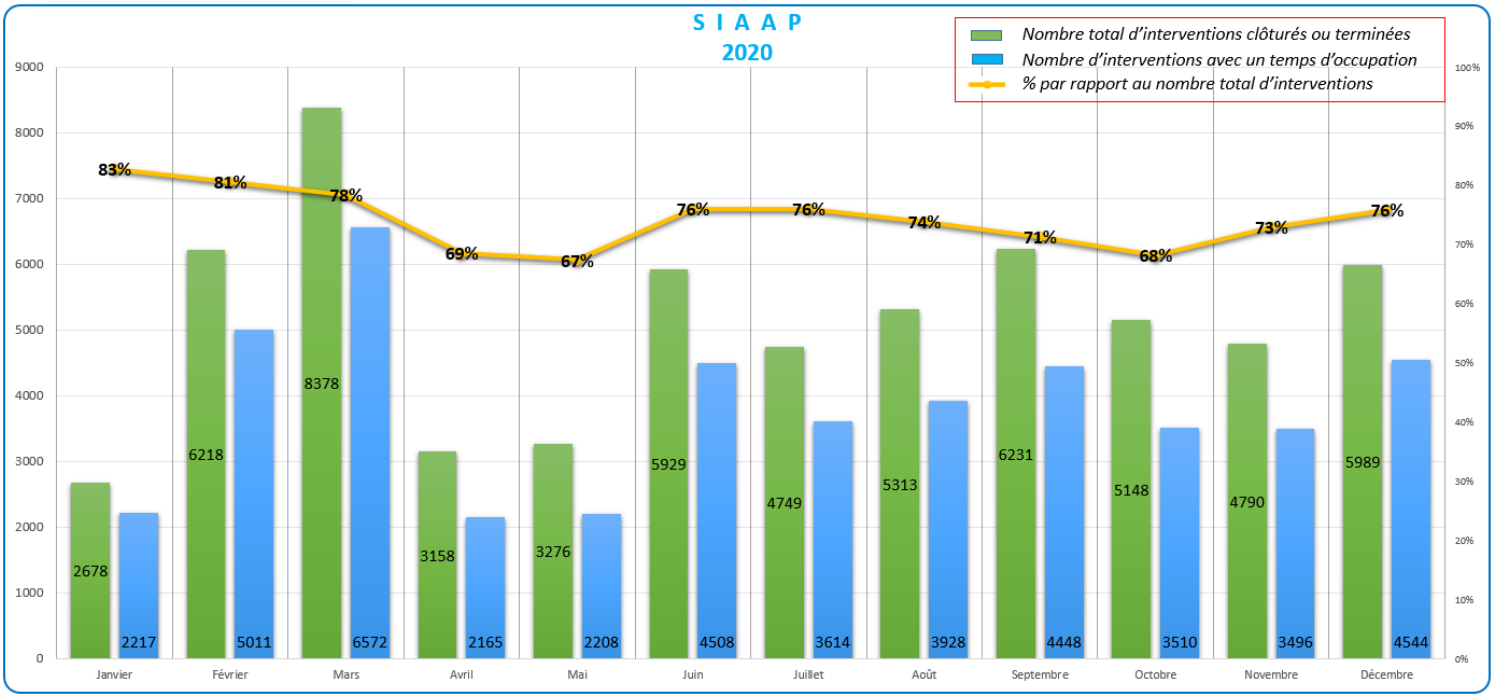
Depuis le mois d'avril 2020, nous ne considérons plus les tournées



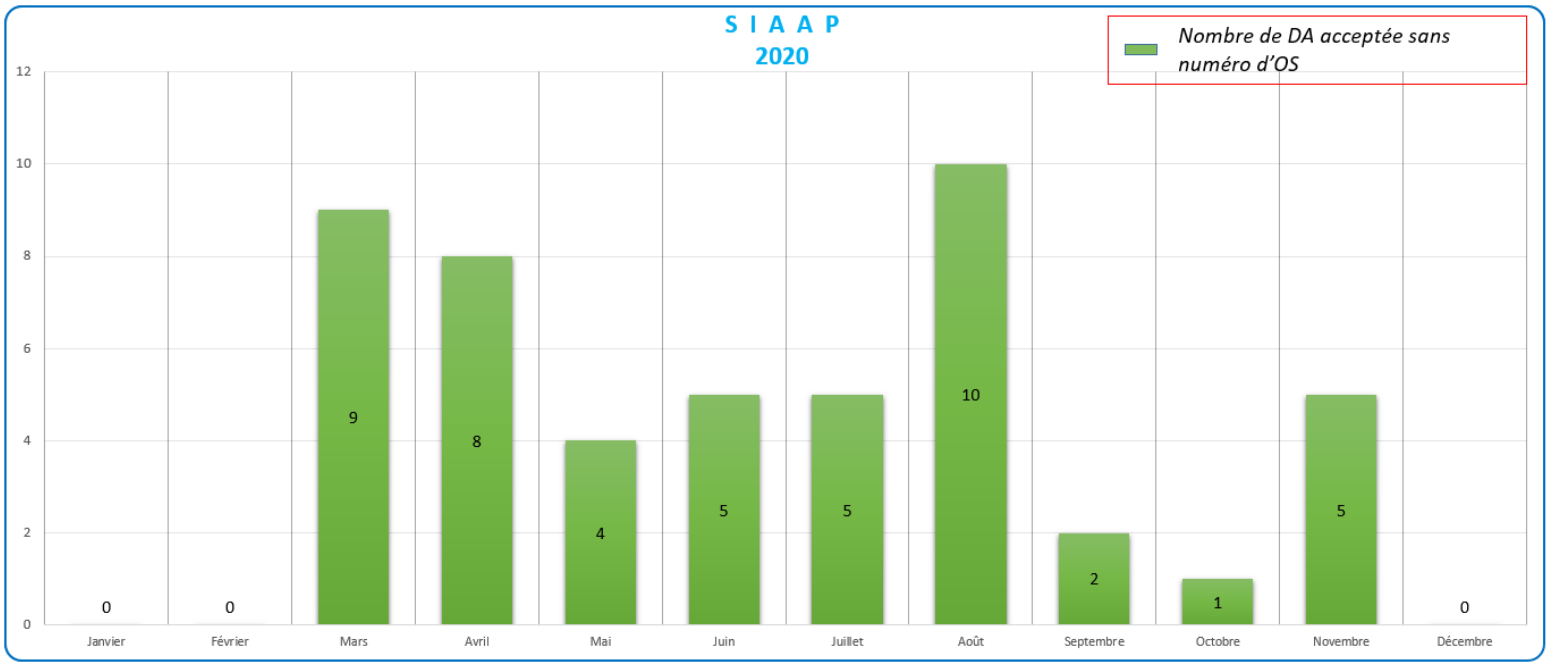
- ***Indicateur 2.*** ***Nombre de Demandes d'Achat (issues des marchés de maintenance SIAAP) reliées à une intervention***



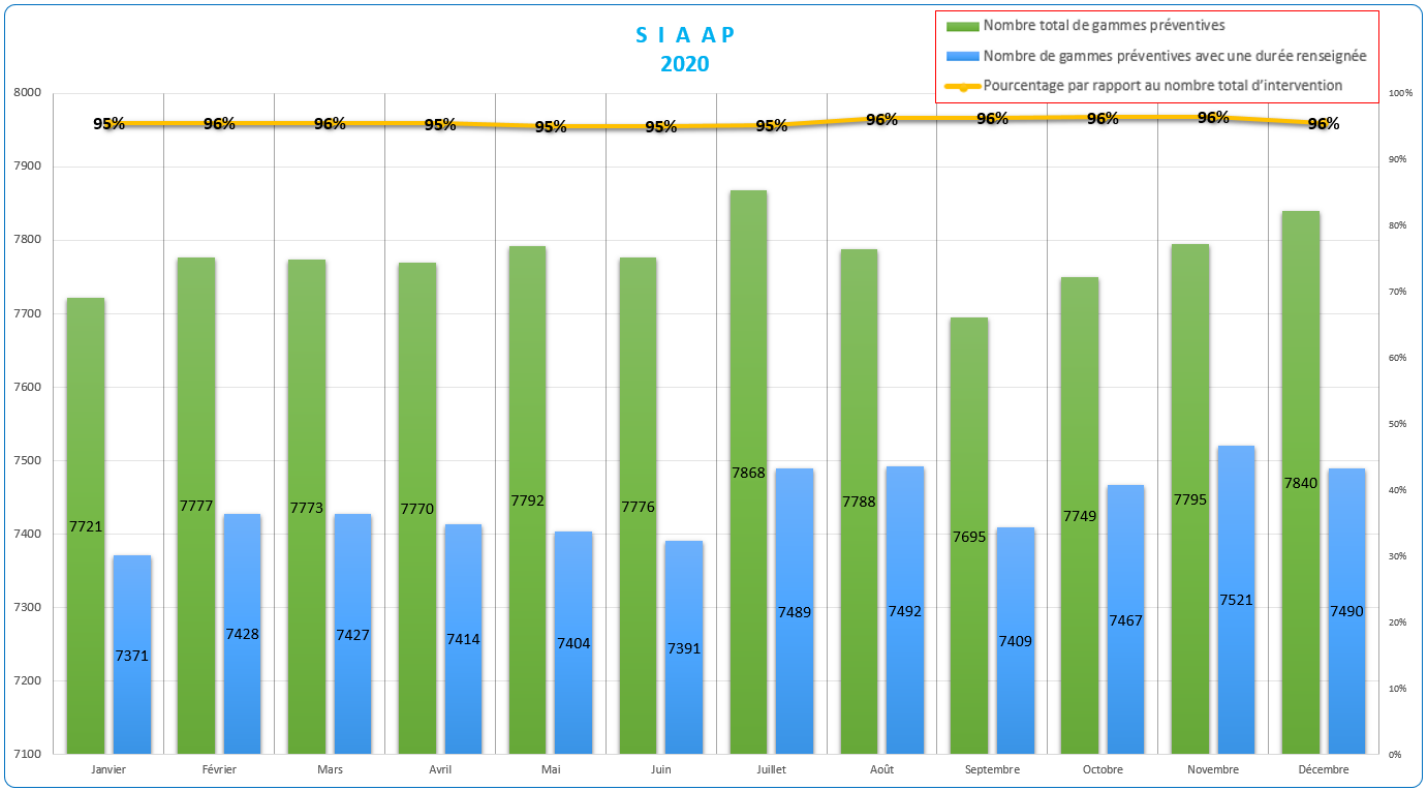
- ***Indicateur 3.*** ***Nombre d'Interventions clôturées ou terminées avec un temps d'occupation renseigné (≠ 0)***



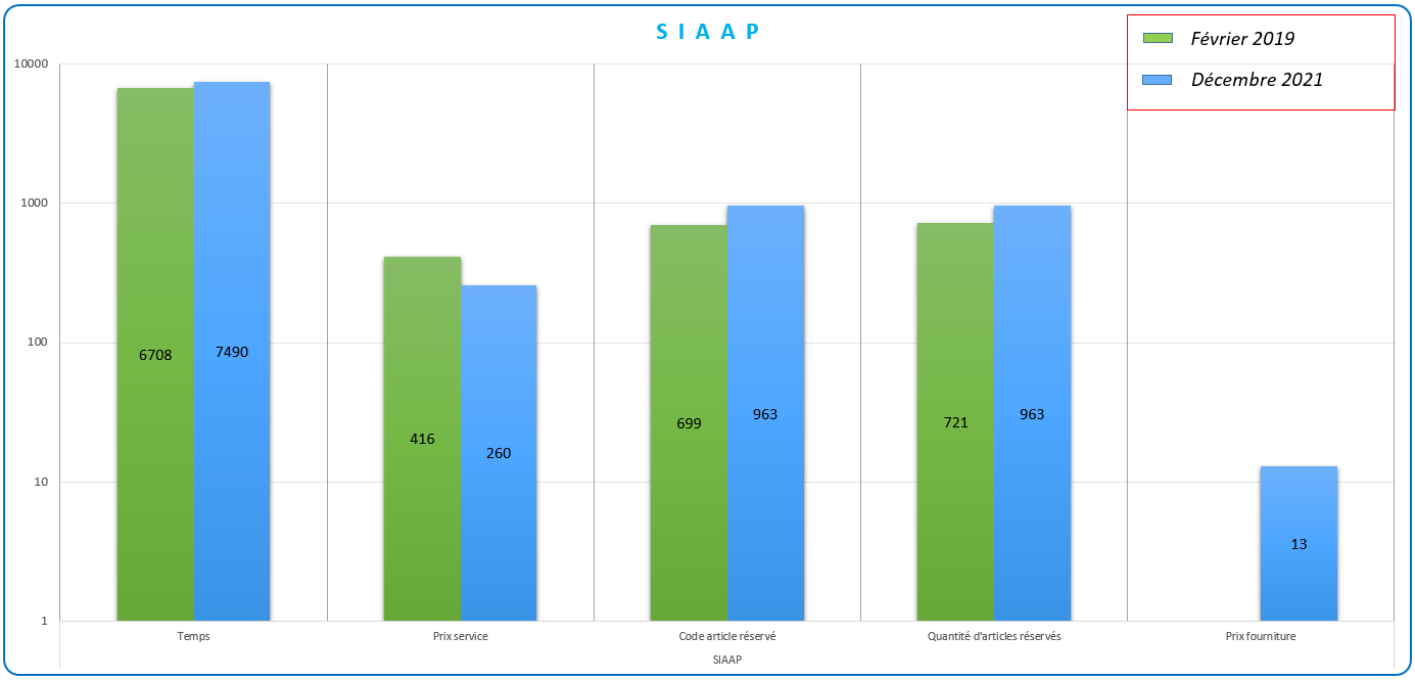
- ***Indicateur 4.*** ***Nous considérons les Demandes d'Achat à partir de l'état « accepté » sans numéro d'OS renseigné***



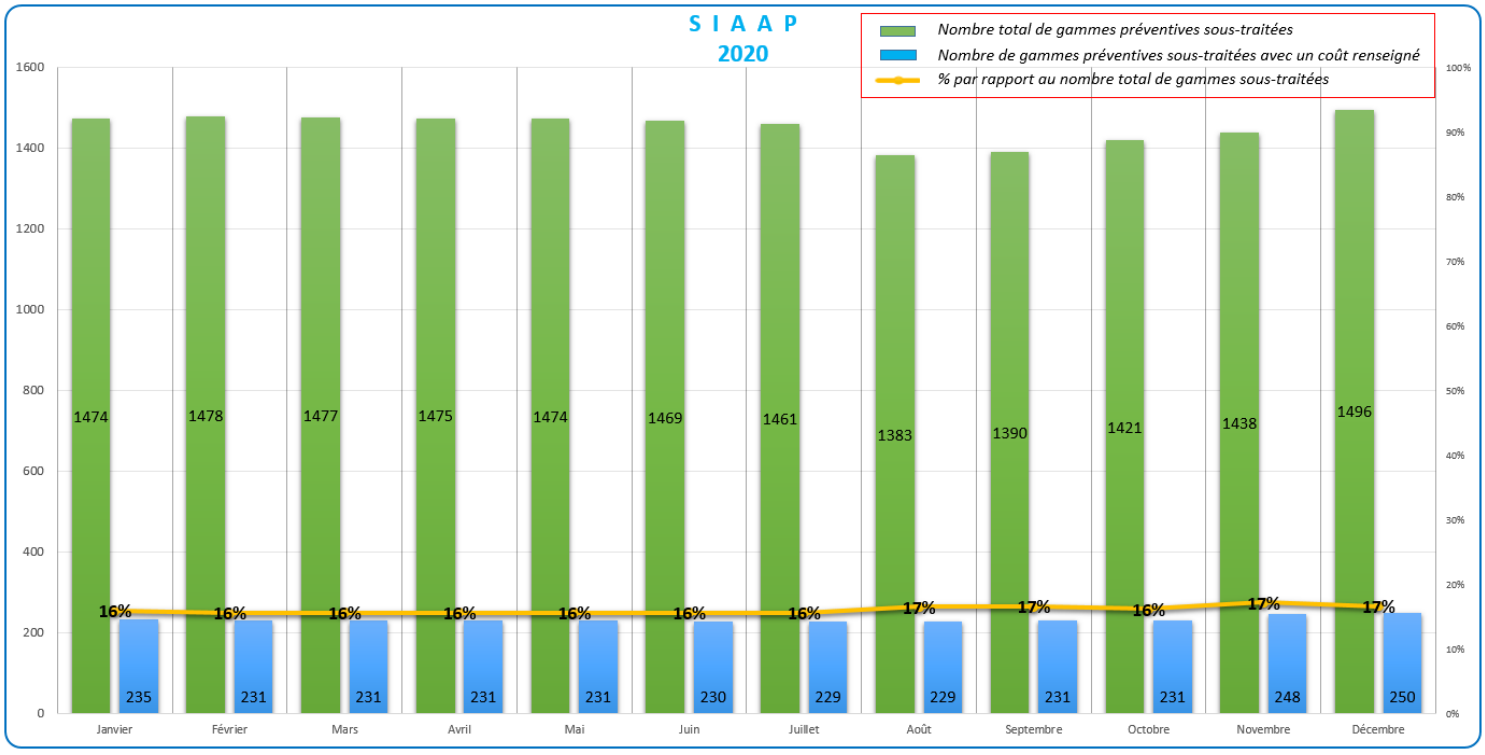
- ***Indicateur 5.*** ***Nombre de gammes préventives avec un temps prévu (≠ 0)***



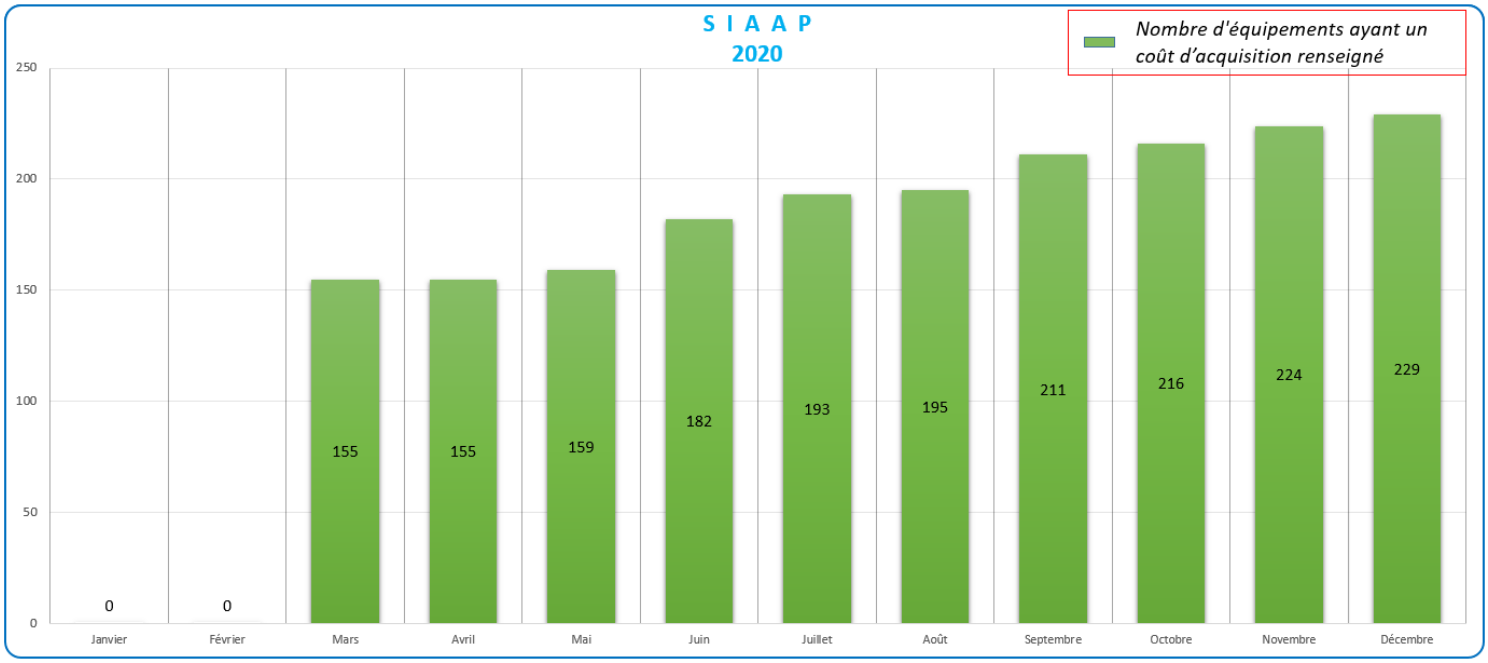
- ***Indicateur 6.*** ***Répartition des gammes du SIAAP en fonction du nombre de caractéristiques renseignées***



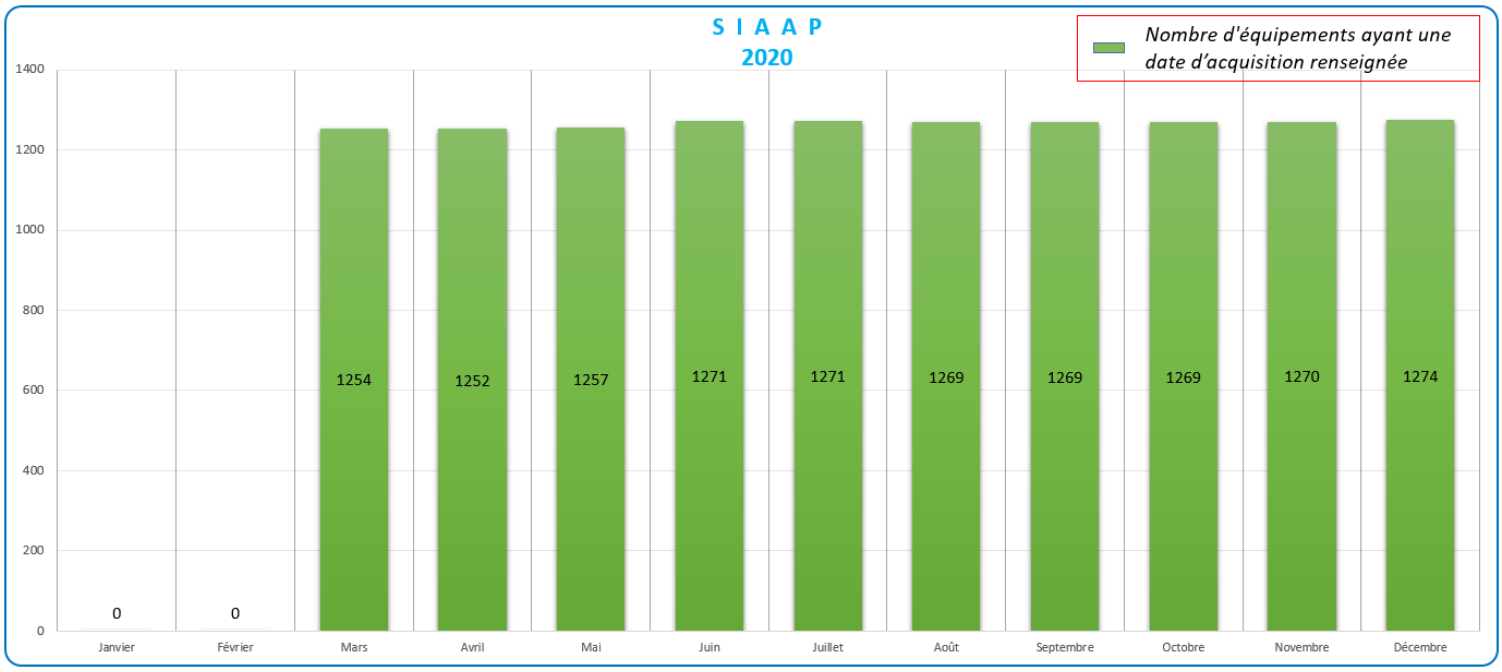
- ***Indicateur 7.*** ***Nombre de gammes de maintenance préventives et externalisées avec un coût renseigné***



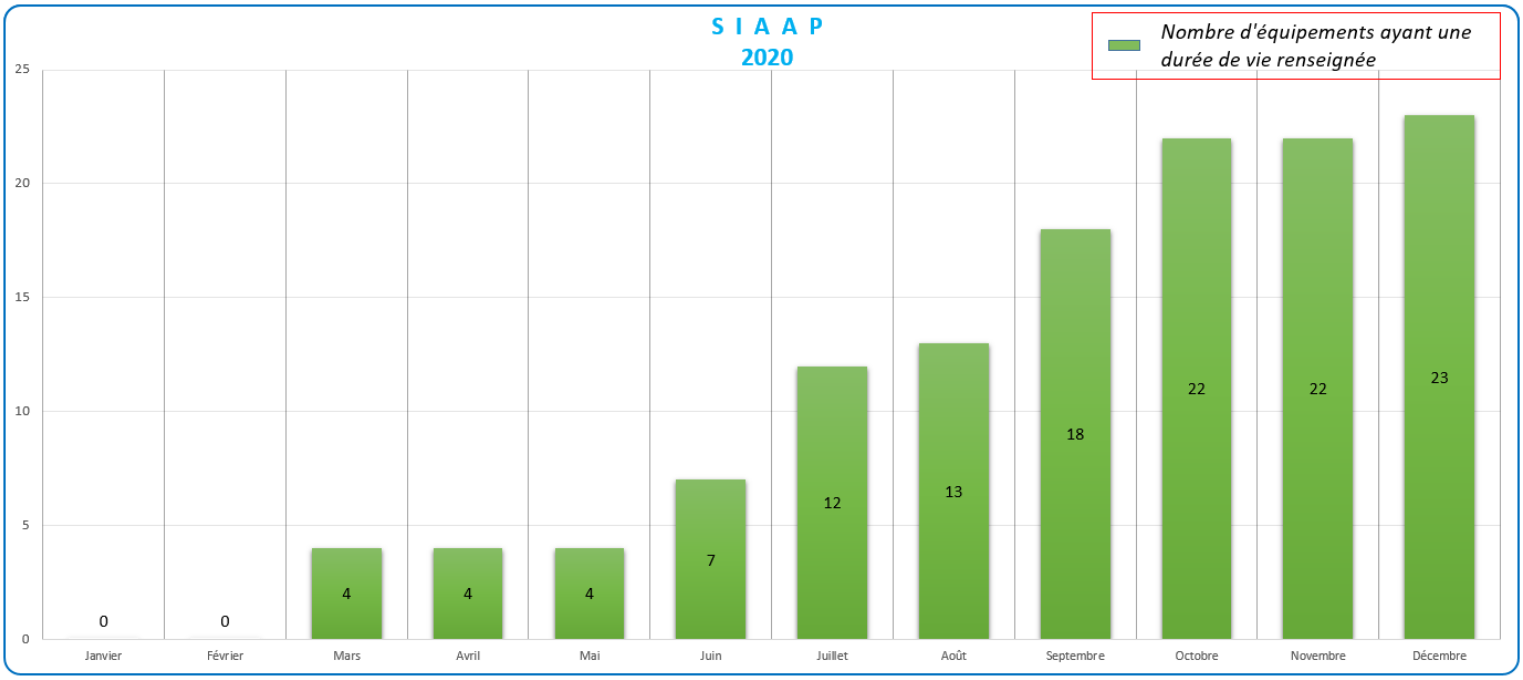
- ***Indicateur 8.*** ***Nombre de matériels ayant un coût d'acquisition renseigné (donc ≠ 0 ou NULL)***



- ***Indicateur 9.*** ***Nombre de matériels ayant une date d'acquisition renseignée (donc ≠ 0 ou NULL)***



- ***Indicateur 10.*** ***Nombre de matériels ayant une durée de vie renseignée (donc ≠ 0 ou NULL)***



Annexe 20 – Principales caractéristiques des participants au questionnaire de Terry Wireman (Wireman, 2015)

Liste des participants au questionnaire	Principales caractéristiques				
	Ville	Zone géographique	Nombre d'usines de traitement et d'assainissement des eaux usées	Volume d'eau traité quotidiennement *(m^3/jour)*	Population desservie *(Nb. d'habitants)*
Berliner Wasserbetriebe	Berlin	Europe occidentale	6	0,66M	4M
Delfluent Services	La Haye	Europe occidentale	2	0,26M	1,5M
Hamburg Wasser	Hambourg	Europe occidentale	1	0,44M	2M
LA Sanitation	Los Angeles	Amérique du Nord	4	2,1M	4M
New-York Department of Environmental Protection	New-York-City	Amérique du Nord	14	4,9M	9M
Public Utilities Board of Singapore	Singapour	Asie	4	1,7M	6M
SIAAP	Paris	Europe occidentale	6	2,5M	9M
Thames Water	Londres	Europe occidentale	5	4M	9M
Waternet	Amsterdam	Europe occidentale	12	0,47M	1,3M
Yokohama Water	Yokohama	Asie	11	1,5M	3,7M

Annexe 21 – Représentation graphique des résultats obtenus via questionnaire de Terry Wireman (Wireman, 2015) appliqué aux domaines de l'assainissement des eaux usées

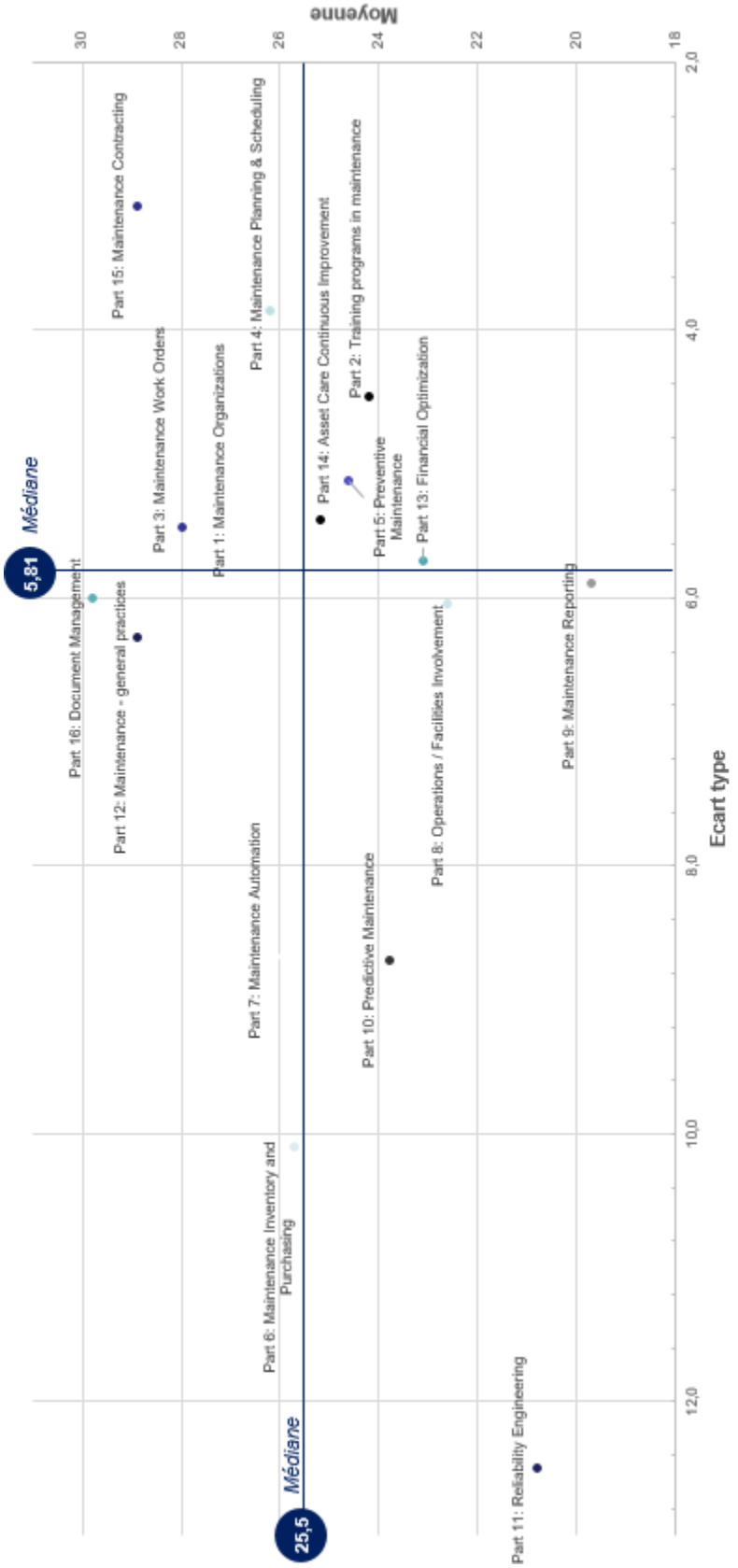


Table des figures

Figure 1: Thèmes et axes de recherche du LCPI 18
Figure 2: Logo type de l'entreprise 20
Figure 3: Répartition des usines du SIAAP sur la région île de France 21
Figure 4: Répartition globale des dépenses d'exploitation 2014 de l'usine de Seine Aval 22
Figure 5: Benchmark des coûts unitaires de maintenance 23
Figure 6: Formalisation des spécificités du SIAAP 24
Figure 7: Les quatre domaines principaux couverts dans l'état de l'art 25
Figure 8: Illustration des concepts généraux présentés dans la norme NF X60-500 27
Figure 9: Décomposition simplifiée du cycle de vie d'un produit 27
Figure 10: Liens de causalité entre la stratégie et la capacité de maintenance 31
Figure 11: Représentation du Processus de maintenance selon (Mikler, 2015) 34
Figure 12: Représentation du processus de maintenance selon (Campbell and Reyes-Picknell, 1995) 35
Figure 13: Equivalence entre les différentes décomposition du processus de maintenance 35
Figure 14: Triangle de la performance (Gibert, 1980) 36
Figure 15: Modélisation "entrées-sorties" de la maintenance (Visser, 1998) 37
Figure 16: Modélisation du contexte de la maintenance selon (Pintelon and Parodi-herz, 2015) 39
Figure 17: Recommandations issues de la littérature concernant les principales composantes du management de la maintenance 40
Figure 18: Les principales décisions impactant la maintenance 44
Figure 19: étapes fondamentales de la méthode RCM de base (Zwingelstein, 2015a) 46
Figure 20: Les "six big losses" du Taux de Rendement Synthétique 47
Figure 21: Analyse des coûts de cycle de vie (Marquez et al. , 2009) 49
Figure 22: les niveaux d'actifs industriels et la gestion associée selon (BSI PAS 55, 2008) 50
Figure 23: Aperçu de la méthode d'amélioration de la maintenance proposée par (Vanneste and Van Wassenhove, 1995) 52
Figure 24: Modèle d'optimisation du management de la maintenance proposé par (Marquez et al.) 53
Figure 25: Vue d'ensemble schématique du cadre proposé par (Waeyenbergh and Pintelon, 2002) 54
Figure 26: La pyramide du management de la maintenance (Wireman, 2015) 55
Figure 27: les cycles naturels d'amélioration continue au sein de la fonction maintenance selon (Mikler, 2015) 56
Figure 28: Paramètres influençant les modèles d'optimisation de la maintenance 57
Figure 29: Les trois aspects des stratégies globales de changement selon (Ackerman Anderson and Anderson, 2010) 71
Figure 30: Structure globale de la méthodologie 82
Figure 31: Présentation globale de la méthodologie 83
Figure 32: Première phase de la méthodologie: analyses de la fonction maintenance 84
Figure 33: Formalisation des étapes de l'audit maintenance 87
Figure 34: Résultats du Benchmark proposé par (Wireman, 2015) 89
Figure 35: classement par ordre décroissant des coûts de maintenance des équipements d'un atelier – schéma de principe 90
Figure 36: principe d'amélioration du « Wrench Time » 91
Figure 37: Exemples de répartition des temps de travail estimée à l'aide de l'approche de (Palmer, 2013) 92
Figure 38: Deuxième phase de la méthodologie: Outils d'optimisation de la maintenance 95
Figure 39: Prise en compte de la criticité et de la maintenance conditionnelle dans la reprise des plans de maintenance 96
Figure 40: Grille de criticité 97
Figure 41: Impacts de la criticité dans la gestion quotidienne de la maintenance 98
Figure 42: Evolution des économies suite à la mise en place de la maintenance conditionnelle 100
Figure 43: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance préventive des équipements d'un atelier croisé avec le niveau de criticité – schéma de principe 101
Figure 44: Outil de prévision de la disponibilité des équipes de maintenance selon leurs compétences 105
Figure 45: identifier les opérations de maintenance à réaliser - schéma de principe 106
Figure 46: Descriptif des principaux ajustements quotidiens du planning hebdomadaire 107
Figure 47: Intégration des outils d'optimisation de la maintenance dans le processus maintenance 108

Figure 48: Cadre structurant la mesure de la performance pour la fonction maintenance – adapté des travaux de (Muchiri et al., 2011) *112*
Figure 49: Exemples d'indicateurs d'avancement pour le déploiement de la méthodologie *112*
Figure 50: Découpage des indicateurs de performance de la maintenance selon (Kumar et al., 2013) *113*
Figure 51: Rappel de la méthodologie présentée au chapitre 2 ..... *117*
Figure 52: Représentation de la phase 1 du projet d'entreprise SIAAP 2030 ..... *119*
Figure 53: Séquencement du projet stratégique SIAAP 2030 et du projet de thèse *119*
Figure 54: Rappel de la première phase de la méthodologie présentée au chapitre 2 ..... *121*
Figure 55: Benchmark des coûts unitaires de maintenance - moyenne *123*
Figure 56: Représentation du benchmark des bonnes pratiques de maintenance à travers le SIAAP sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) *125*
Figure 57: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance des équipements des ateliers du Prétraitement, de la clarifoculation, de la biologie et de La Frette de l'usine Seine Aval *127*
Figure 58: Répartition des temps d'intervention observés pour des équipes de SEC, SAM et la DSAR *129*
Figure 59: Détail quotidien du nombre de connexion à la GMAO sur le mois de septembre 2018 ..... *130*
Figure 60: Répartition des interventions de maintenance effectuées sur l'année 2017 en fonction de leur nature - données issues de la GMAO du SIAAP *131*
Figure 61: Evaluation du niveau d'utilisation de 10 fonctionnalités de la GMAO pour chaque direction opérationnelle du SIAAP *132*
Figure 62: Liste des informations indispensables à renseigner en GMAO *135*
Figure 63: Rappel de la deuxième phase de la méthodologie présentée au chapitre 2 ..... *137*
Figure 64: Synthèse des règles de prise en compte de la criticité dans la gestion de la maintenance *139*
Figure 65: Principales étapes du déploiement de l'analyse de criticité *140*
Figure 66: Répartition des équipements de l'usine SEM en fonction de leur criticité *141*
Figure 67: Etapes de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle au SIAAP *142*
Figure 68: Classement par ordre décroissant des coûts de maintenance préventive des équipements des ateliers du prétraitement, de la clarifoculation, de la biologie et de La Frette de l'usine Seine Aval, croisé avec le niveau de criticité – zoom sur le début de ce classement *145*
Figure 69: Schématisation de la reprise des plans de maintenance au SIAAP *145*
Figure 70: Liste des informations nécessaires à la bonne tenue des opérations de maintenance *147*
Figure 71: Journée type du préparateur sur l'usine Seine Morée *148*
Figure 72: Rappel de la troisième phase de la méthodologie présentée au chapitre 2 ..... *150*
Figure 73: Processus global de planification du SIAAP *151*
Figure 74: Formalisation pour le SIAAP des enjeux liés à l'étape de planification hebdomadaire *152*
Figure 75: Formalisation pour le SIAAP des enjeux liés à l'étape d'ajustements quotidiens du planning *152*
Figure 76: Processus maintenance mis en place au SIAAP *154*
Figure 77: Indicateur de pilotage de la maintenance n° I. et son périmètre associé *157*
Figure 78: Répartition de la criticité pour l'ensemble des équipements du SIAAP *160*
Figure 79: Evolution mensuelle à l'échelle du SIAAP du nombre d'interventions réalisées ayant un temps d'occupation renseigné en GMAO (indicateur III) – données issues de la GMAO du SIAAP *162*
Figure 80: Niveau de mise en œuvre global au SIAAP de la méthodologie *164*
Figure 81: Evolution entre 2018 et 2020 du niveau de mise en œuvre des bonnes pratiques de maintenance à travers le SIAAP sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) *166*
Figure 82: Benchmark des bonnes pratiques de maintenance implémentée dans le secteur d'assainissement des eaux usées sur la base du questionnaire proposé par (Wireman, 2015) - 2020 ..... *168*
Figure 83: Apport de la maintenance pour la gestion du patrimoine industriel et de son exploitation *171*
Figure 84: Rappel de la méthodologie proposée *176*
Figure 85: Les informations clés pour le processus « Gérer le Patrimoine Industriel » *182*
Figure 86: Représentation de la notion "d'objet patrimonial" - exemple pompe *185*
Figure 87: Evolution de la méthodologie *186*

HESAM UNIVERSITÉ

Antoine FEUGIER

Arts et Métiers Sciences et Technologies

Modélisation, formalisation et mise en place d'une méthodologie de transformation à grande échelle de la fonction maintenance pour la rendre plus performante. Cas d'application à un grand service public d'assainissement et de traitement des eaux usées.

Résumé

Aujourd'hui, la maintenance occupe une place stratégique au sein des entreprises industrielles et représente un enjeu économique important. L'apport potentiel des technologies de l'industrie 4.0 renforce, pour les industriels, la volonté d'optimiser la maintenance. Pour autant, la recherche scientifique sur les modèles d'optimisation de la maintenance éprouve des difficultés à proposer des solutions adaptées aux contraintes industrielles pour répondre aux besoins croissants d'amélioration de la fonction maintenance. Dans ce contexte, notre thèse de doctorat soulève la question du changement des pratiques de maintenance pour améliorer sa performance. Plus spécifiquement, l'appropriation par les équipes de maintenance des modèles d'optimisation de la maintenance et des nouveaux apports technologiques de l'industrie 4.0 reste complexe, et peu d'entreprises y parviennent. A travers un ensemble d'études de terrain et de l'état de l'art, nous soulignons toute la complexité de la maintenance avec notamment ses dimensions techniques, économiques et humaines. Cela nous permet de proposer une hypothèse de résolution qui consiste à formaliser un modèle managérial global de la fonction maintenance. Afin de tester notre hypothèse, nous proposons une méthodologie d'évolution de la fonction maintenance. Elle se compose en trois grandes phases ; une phase d'analyse contextuelle de l'entreprise, puis d'optimisation et enfin de mise en œuvre et d'amélioration continue. Derrières ces trois phases nous définissons plusieurs briques auxquelles nous associons différentes techniques d'optimisation de la maintenance. Ces briques sont orientées selon deux axes d'optimisation : l'efficacité de la maintenance, et l'efficience de la maintenance. Cette méthodologie a été appliquée au SIAAP, un service public d'assainissement de plus de 1 700 employés, et a permis d'améliorer la performance de sa fonction maintenance.

Mots-clés : *Maintenance ; Transformation ; Stratégie de maintenance ; Performance ; Asset Management*

Abstract

Today, maintenance occupies a strategic position within industrial companies and represents an important economic challenge. The potential contribution of Industry 4.0 technologies reinforces the desire of manufacturers to optimise maintenance. However, scientific research on maintenance optimisation models is having trouble in proposing solutions adapted to industrial constraints to respond to the growing need to improve maintenance. In this context, our doctoral thesis raises the question of changing maintenance practices to improve performance. More specifically, the appropriation by maintenance teams of maintenance optimisation models and the new technological contributions of Industry 4.0 remains complex, and few companies have succeeded in doing so. We underline the complexity of maintenance with its technical, economic and human dimensions through a set of field studies and state-of-the-art. This allows us to propose a resolution hypothesis that consists of formalising a global managerial model of the maintenance function. To test our hypothesis, we propose a methodology for the evolution of the maintenance function. It comprises three main phases: a contextual analysis phase, then optimisation and finally implementation and continuous improvement. Behind these three phases, we define several bricks to which we associate different maintenance optimisation techniques. These bricks are oriented according to two axes of optimisation: the effectiveness of maintenance and maintenance efficiency. This methodology has been applied to the SIAAP, a public sanitation service with more than 1,700 employees, and has allowed improving the performance of its maintenance function.

Key words: Maintenance; Transformation; Maintenance Strategy; Performance; Asset Management