



École doctorale n° 417 Sciences et Ingénierie

THESE de DOCTORAT EN COTUTELLE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

CY CERGY PARIS UNIVERSITE / ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS
DE SFAX

Spécialité doctorale “ Sciences et Techniques de l’Information et de
la Communication”

présentée et soutenue publiquement par

AMEL SOLTANE

le 10 décembre 2021

**Méthodes et outils pour la conception de
produits/systèmes en tenant compte de l’obsolescence
et la raréfaction**

Jury :

M. Anis Chelbi,	Professeur, École nationale supérieure d’ingénieurs de Tunis	Rapporteur
M. Eric Bonjour,	Professeur, Université de Lorraine	Rapporteur
M. Ali Akrouf,	Professeur, École Nationale d’Ingénieurs de Tunis	Examinateur
Mme. Julie Le Cardinal,	Professeur, Ecole Centrale Supélec	Présidente
M. Marc Zolghadri,	Professeur, ISAE-Supméca	Co-Directeur
M. Maher Barkallah,	Professeur, École Nationale d’Ingénieurs de Sfax	Co-Directeur
M. Sid-Ali Addouche,	Maître de Conférences, Université Paris 8	Co-Encadrant
M. Mohamed Haddar,	Professeur, École Nationale d’Ingénieurs de Sfax	Co-Encadrant

Résumé

Les entreprises doivent être en mesure d'améliorer la conception de leurs produits pour s'assurer qu'ils continuent à répondre aux besoins évolutifs des clients. Les changements de système peuvent également être induits par les progrès de la recherche et du développement ou par les réglementations imposées par des organismes nationaux ou internationaux qui amènent les entreprises à modifier leurs conceptions. Parmi les différents types de changements, notre travail se concentre sur l'étude de ceux générés par l'obsolescence. Un produit ou un système est obsolète lorsqu'il ne répond plus aux fonctionnalités attendues par les clients. Le concepteur doit être alors capable de concevoir des systèmes de telle sorte qu'un problème d'obsolescence ait le moins de conséquences indésirables possibles. Le fait qu'un système reste peu sensible aux changements imposés par la résolution de l'obsolescence est appelé résilience. Nos travaux visent à contribuer à la prise en compte de l'obsolescence dès les premières étapes de la conception d'un système. Les problèmes consistent alors à cartographier, à caractériser et à quantifier les effets possibles d'une obsolescence initiale et les obsolescences dérivées qu'elle génère. Pour ce faire, nous proposons une méthodologie de conception résiliente à l'obsolescence pour les systèmes, appelée « Obsolescence Resilience By Construct, ORByC ».

La toute première étape consiste à expliciter les dépendances internes de l'architecture du système. Nous avons choisi l'une des méthodologies d'ingénierie système les plus établies, ARCADIA. Les modèles obtenus par l'application de cette méthodologie fournissent suffisamment d'informations, et cela à un niveau de détail souhaité, pour être en mesure de cartographier les différents types de dépendances entre les composants et/ou les fonctions. Ces dépendances sont représentées par des matrices DSM (Design Structure Matrix) et DMM (Domain Mapping Matrix) pour construire un graphe de dépendance unique. Celui-ci est ensuite transformé en un graphe orienté probabiliste, i.e. le réseau Bayésien, qui appartient à la famille des modèles graphiques probabilistes. La particularité de ces réseaux est liée à leur capacité à modéliser des connaissances imparfaites entachées d'incertitude. Ces réseaux offrent la possibilité de mener diverses études quantitatives (diagnostiques ou pronostiques par exemple). Celle-ci permet aux concepteurs d'étudier la résilience du système face aux divers scénarios d'obsolescence et ainsi de mettre en œuvre les choix judicieux de conception.

Abstract

Companies must be able to improve the design of their products to ensure that they continue to meet the evolving needs of customers. System changes can also be driven by advances in research and development or by regulations imposed by national or international bodies that cause companies to modify their designs. Among the different types of changes, our work focuses on the study of those generated by obsolescence. A product or a system is obsolete when it no longer meets the functionalities expected by the customers. The designer must then be able to design systems in such a way that an obsolescence problem has the least possible undesirable consequences. The fact that a system remains insensitive to changes imposed by the resolution of obsolescence is called resilience. Our work aims at contributing to the consideration of obsolescence at the early stages of system design. The problems then consist in mapping, characterizing and quantifying the possible effects of an initial obsolescence and the derived obsolescences it generates. To do so, we propose an obsolescence resilient design methodology for systems, called "Obsolescence Resilience By Construct, ORByC".

The very first step is to make explicit the internal dependencies of the system architecture. We have chosen one of the most established system engineering methodologies, ARCADIA. The models obtained by the application of this methodology provide enough information, at a desired level of detail, to be able to map the different types of dependencies between components and/or functions. These dependencies are represented by DSM (Design Structure Matrix) and DMM (Domain Mapping Matrix) matrices to build a single dependency graph. This is then transformed into a probabilistic directed graph, i.e. the Bayesian network, which belongs to the family of probabilistic graphical models. The particularity of these networks is linked to their capacity to model imperfect knowledge tainted by uncertainty. These networks offer the possibility of conducting various quantitative studies (diagnostic or prognostic for example). This allows designers to study the resilience of the system in the face of various obsolescence scenarios and thus to implement judicious design choices.

Dédicaces

À ma mère, mon père, mes sœurs et mon frère.

Remerciements

Ce travail est le fruit de collaboration de mes co-directeurs et co-encadrants.

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de thèse Français « Pr. Marc ZOLGHARDRI ». Je le remercie pour le temps et la patience que vous m'avez accordés tout au long de ces trois années. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse Tunisien « Pr. Maher BARKALLAH » d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, vos qualités humaines, votre patience et vos précieux conseils.

Je tiens à remercier mon co-encadrant de thèse Français « Dr. Sid-Ali ADDOUCHE » qui m'a conseillé et aidé avec beaucoup d'enthousiasme et de rigueur scientifique. Je lui serai toujours reconnaissant pour la disponibilité et les heures qu'il m'a consacrées, ainsi que pour ses suggestions constructives et la confiance qu'il m'a témoignée dans le long cheminement de ma thèse.

Je tiens à remercier mon co-encadrant de thèse Tunisien « Pr. Mohamed Haddar », à qui j'adresse mes remerciements les plus sincères pour sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines. Que vous soyez assuré de mon entière reconnaissance.

Ma gratitude s'adresse à Madame et Messieurs les membres de Jury de cette thèse. Je tiens à remercier « Pr. Julie Lecardinal » et « Pr. Ali Akrouf » pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membre de mon jury de thèse. Enfin, je tiens à remercier « Pr. Eric Bonjour » et « Pr. Anis Chalbi » qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse.

Un grand merci également à ma meilleure amie « Amel Soufi » pour son soutien et ses précieux conseils.

Table des matières

Dédicaces	1
Remerciements	2
1 Contexte et Problématique	10
1.1 Contexte de nos travaux : L'obsolescence des systèmes	11
1.2 Problématique de la thèse	13
1.3 Structuration de la thèse	15
1.4 Publications	16
2 État de l'art	18
2.1 Introduction	19
2.2 Obsolescence	19
2.2.1 Définitions de l'obsolescence	20
2.2.2 Obsolescence et diminution des sources de fabrication et des pénuries de matières (DMSMS)	21
2.2.3 Identification des facteurs d'obsolescence	22
2.2.4 Stratégies de remédiation de l'obsolescence	24
2.3 Ingénierie des systèmes (IS)	28
2.3.1 Les outils et les méthodologies de l'ingénierie système	28
2.3.2 Le choix d'ARCADIA	33
2.4 Les matrices de dépendances : DSM et DMM	35
2.5 Les Réseaux Bayésiens	38
2.6 Conclusion	41
3 Propagation de l'obsolescence	43
3.1 Introduction	44
3.2 La propagation de changement	44
3.3 La chaîne d'approvisionnement considérée	46
3.4 Propagation d'O/DMSMS	47
3.4.1 Propagation d'O/DMSMS dans l'architecture du produit	47
3.4.2 Propagation d'O/DMSMS dans la chaîne logistique	48

3.5	Barrières entourant l'O/DMSMS	50
3.5.1	Barrière technique : une solution au problème de l'obsolescence	50
3.5.2	Barrière au risque d'approvisionnement : une solution au problème des DMSMS	53
3.6	Conclusions	55
4	La résilience à l'obsolescence	56
4.1	Introduction	57
4.2	La résilience de système	57
4.2.1	Les définitions de la résilience dans la littérature	58
4.2.2	La résilience et la robustesse	59
4.3	La résilience à l'obsolescence (Obso-Résilience)	61
4.3.1	Définition d'Obso-Résilience	62
4.3.2	Le processus d'Obso-Résilience	62
4.4	Évaluation la résilience à l'obsolescence	63
4.5	Conclusion	66
5	La méthodologie ORByC	67
5.1	Introduction	68
5.2	Concepts de base de la modélisation de l'architecture	68
5.3	Première étape ORByC : construction d'un réseau bayésien	70
5.3.1	Phase 1 : Modélisation du système	70
5.3.2	Phase 2 : Modèle de dépendance (MD)	72
5.3.3	Phase 3 : Transformation de MD en réseau bayésien (RB)	73
5.3.4	Paramétrage et vérification du RB	73
5.4	Deuxième étape d'ORByC : Simulations de RB pour étudier la résilience à l'obsolescence :	76
5.4.1	Élaboration de scénarios d'obsolescence et génération d'alternatives	76
5.4.2	Système d'indicateurs de performance (SIP)	78
5.4.3	Simulation et Interprétation	78
5.5	Conclusion	81
6	Étude de cas	83
6.1	Introduction	84
6.2	Le système ERTMS – Contexte et cas d'étude	84
6.3	Première étape : construction des réseaux bayésiens ERTMS	86
6.3.1	Phase 1 : Modélisation du système	86
6.3.2	Phase 2 : Modèle de dépendance (DM).	92
6.3.3	Phase 3 : Transformation du DM en réseau bayésien.	93

6.4	Deuxième étape : Simulations de réseau bayésien pour étudier la résilience à l'obsolescence de l'ERTMS	97
6.4.1	Indicateurs de performance pour le système ERTMS	97
6.4.2	Élaboration de scénarios et génération d'alternatives	99
6.4.3	Simulations et interprétations	101
6.5	Conclusion	103
	Conclusion générale	105
	Annexes	109
	Annexe 1	109
	Annexe 2	112
	Bibliographie	130

Table des figures

1.1	Durée de vie prévisible des systèmes d'armes, (Stogdill, 1999).	12
1.2	Analyse de la stratégie de vente des OEM, (Mulholland, 2017).	13
1.3	Le contexte de travail de recherche	14
1.4	Structuration de la thèse	15
2.1	Analyse Cause-Effet d'obsolescence (Wilkinson, 2015)	23
2.2	Management de l'obsolescence chez Honeywell (Wilkinson, 2015)	25
2.3	Méthodologie de prévision du cycle de vie (Solomon u. a., 2000)	26
2.4	Types de diagrammes SysML (Hause u. a., 2006)	29
2.5	Les trois piliers de MBSE avec ARCADIA / Capella (Roques, 2016).	34
2.6	Les vues et les perspectives structurant la démarche ARCADIA, (Voirin, 2017).	36
2.7	Multiple Domain Matrix (MDM), Domain Mapping Matrix (DMM) et Design Structure Matrix (DSM), adapté de (Marija u. a., 2017)	37
2.8	Représentation DSM des composants connectés (Börjesson, 2012)	38
2.9	Les réseaux bayésiens englobent la théorie et les données, (Conrady und Jouffe, 2013)	39
2.10	Un réseau bayésien représentant la relation statistique entre deux variables, (Conrady und Jouffe, 2013)	40
2.11	Le flux de travail de BayesiaLab avec les réseaux bayésiens en son cœur, (Conrady und Jouffe, 2013)	41
2.12	les concepts et outils utilisés dans ce travail de recherche	42
3.1	La propagation de l'obsolescence dans l'architecture des produits	46
3.2	Les voies de propagation de l'obsolescence	49
3.3	Propagation de l'O/DMSMS à travers l'architecture du produits et la chaîne d'approvisionnement	51
3.4	Illustration des barrières techniques au sein de l'architecture du produit	53
3.5	Le processus de SCRM (Charles u. a., 2015)	54
4.1	Bibliométrie via Google Livres pour 'System(s) Resilience', de Source de données : Google Books Ngram Viewer (http://books.google.com/ngrams)	58
4.2	La résilience et la robustesse	61

4.3	Le processus d'étude de la résilience à l'obsolescence	64
4.4	Triangle de résilience à l'obsolescence	65
5.1	La méthodologie ORByC	69
5.2	le modèle Entité-Attribut-Modalité de l'architecture	70
5.3	Architecture du produit par ARCADIA	71
5.4	Modélisation des entités par ARCADIA : Architecture physique	72
5.5	les règles de transformation pour les entités	74
5.6	Pas de cycle	76
5.7	Observations exacte et probabiliste	80
6.1	Illustration de l'infrastructure ERTMS (Kousri, 2016)	85
6.2	Le diagramme OCB d'ERTMS Régional [OCB = Operational Capacities Blank]	87
6.3	Le diagramme OAB d'ERTMS Régional, [OAB = Operational Architecture Blank]	88
6.4	Le diagramme SDFB d'ERTMS Régional, [SDFB =System Data Flow Blank]	89
6.5	Le diagramme SAB d'ERTMS Régional. [SAB=System Architecture Blank] .	89
6.6	Le diagramme LAB d'ERTMS Régional [LAB =Logical Architecture Blank] .	90
6.7	Architecture physique de l'ERTMS	91
6.8	Le passage d'ARCAID vers DM	93
6.9	Les simulation des 35 scénarios par BayesiaLab	96
6.10	Le passage de DM vers les RBs	97
6.11	Réseau bayésien de l'architecture physique de l'ERTMS	98
6.12	Le réseau bayésien en 2D de l'architecture physique	99
6.13	Réseau bayésien simplifié de l'architecture physique de l'ERTMS	100
6.14	L'évolution des probabilités de C1 et C2 en fonction de la réalisabilité d'AM .	102
6.15	L'évolution des probabilités de P1, P2 et P3 en fonction de la réalisabilité d'AM.	102
6.16	Réalisabilité d'AM basée sur C1 et C2	103
6.17	Réalisabilité d'AM basée sur P1, P2 et P3	104
6.18	Récapitulation de nos travaux	106
6.19	DMM d'Analyse opérationnelle	109
6.20	DMM de l'Analyse Système	110
6.21	DMM de l'Architecture Logique	110
6.22	Modèle de dépendance d'ERTMS : DMM de l'Architecture Physique	111
6.23	RB de l'Analyse Opérationnelle	112
6.24	RB de l'Analyse Système	113
6.25	RB de l'Analyse Logique	113

Liste des tableaux

2.1	Définitions de l'obsolescence	20
2.2	Définitions de la DMSMS	22
2.3	Obsolescence et DMSMS	23
2.4	Résumé des types de solutions couramment utilisées (SD-22, 2016).	27
2.5	Outils, méthodes et langages de l'ingénierie des systèmes	29
2.6	Une description des méthodologies de MBSE	31
2.7	Les niveaux d'ARCADIA	33
2.8	Les avantages d'ARCADIA et de Capella	35
3.1	Barrières Techniques	52
4.1	Définition de la résilience	60
6.1	Les principaux concepts de l'analyse opérationnelle	87
6.2	Les principaux concepts de l'analyse système	88
6.3	Les principaux concepts de l'architecture logique	90
6.4	Les principaux concepts de l'architecture physique	92
6.5	TPCs de C1, C2 ,P1, P2 et P3	100
6.6	Simulations de diagnostic	101
6.7	Simulations de pronostic	103

Abréviations

AM Autorité de Mouvement

ARCADIA ARChitecture Analysis and Design Integrated Approach

DMSMS Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages

DSM Design Structure Matrix

EPBS End Product Breakdown Structure

ERTMS European Rail Traffic Management System

ETCS European Train Control System

FC Focal Company

IS Ingénierie Système

LAB Logical Architecture Blank

MBSE Model-based systems engineering

MD Modèle de Dépendance

O/DMSMS Obsolescence et Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages

OAB Operational Architecture Blank

OCB Operational Capacity Blank

ORBYC Obsolescence Resilience By Construct

PAB Physical Architecture Blank

RB Réseau Bayésien

RCN Requirement Change Notification

RDN Requirement Discontinuance Notification

SAB System Architecture Blank

SDFB System Data Flow Blank

TPC Table de Probabilité Conditionnelle

Chapitre 1

Contexte et Problématique

1.1 Contexte de nos travaux : L’obsolescence des systèmes

Les produits et les systèmes doivent répondre aux besoins des clients. Ces besoins évoluent et les systèmes doivent évoluer en conséquence. Les changements des systèmes peuvent également être guidée par (i) les progrès de la recherche et du développement, (ii) les réglementations imposées par des organismes nationaux ou internationaux qui amènent les entreprises à modifier leur conception, ou (iii) les changements de conception imposés par la concurrence du marché. Parmi les différents types de changements, notre travail se concentre sur l’étude de ceux générés par l’obsolescence. L’obsolescence correspond au fait qu’un élément devient soit inadapté aux demandes actuelles, soit indisponible auprès du fabricant d’origine, selon le Groupe d’experts ([Group, 2016](#)).

La concurrence intense dans le domaine de l’électronique grand public a également entraîné un changement majeur dans les types de composants que les fabricants sont susceptibles de produire. En raison des économies d’échelle, les fabricants de composants électroniques se sont détournés des produits à faible volume pour se concentrer sur le marché plus rentable de l’électronique grand public à fort volume. Ainsi, ce rythme rapide de production de nouveaux composants électroniques grand public a entraîné l’abandon rapide de composants plus anciens. Les fabricants et les développeurs de systèmes, de produits et de plates-formes à dominante durable sont les plus touchés. Les systèmes militaires et avioniques sont particulièrement vulnérables en raison de leur long cycle de vie typique. Comme le montre la Figure. 1.1, les systèmes d’armes peuvent avoir des cycles de vie longs. Le bombardier B-52, par exemple, a un service prévu jusqu’en 2040, ([Josias u. a., 2004](#)). Cela représente plus de 90 ans de vie utile ! Comme on peut s’y attendre, l’obsolescence est un facteur important en raison des changements technologiques qui ont apporté de nouvelles possibilités pour atteindre la fonctionnalité. Le fléau des problèmes d’obsolescence a peut-être été moins anticipé par l’armée depuis que l’on est passé de l’utilisation de composants à spécifications militaires (personnalisés) à des composants commerciaux (COTS – *commercial off-the-shelf*). La croissance rapide du secteur commercial, due à l’augmentation du contenu technologique des produits de consommation, a amené de nombreux fabricants à cesser de produire des produits à faible volume pour l’armée et à orienter leur production vers les marchés de l’électronique grand public à fort volume. Le problème de l’obsolescence des composants est très répandu et ne se limite pas aux produits militaires et avioniques. Ainsi, traiter l’obsolescence au moment où elle se produit ou après coup devient un gros problème car cela peut entraîner des retards dans le calendrier, des coûts excessifs et des défaillances catastrophiques qui peuvent contraindre même les plus grandes entreprises à la faillite.

[Mulholland \(2017\)](#) détermine le rapport entre les composants obsolètes et le nombre total de composants dans le service de contrôle des produits et des systèmes (CPS) de SIEMENS, voir la Figure. 1.2. Il est intéressant de noter que si le nombre total de composants fournis par

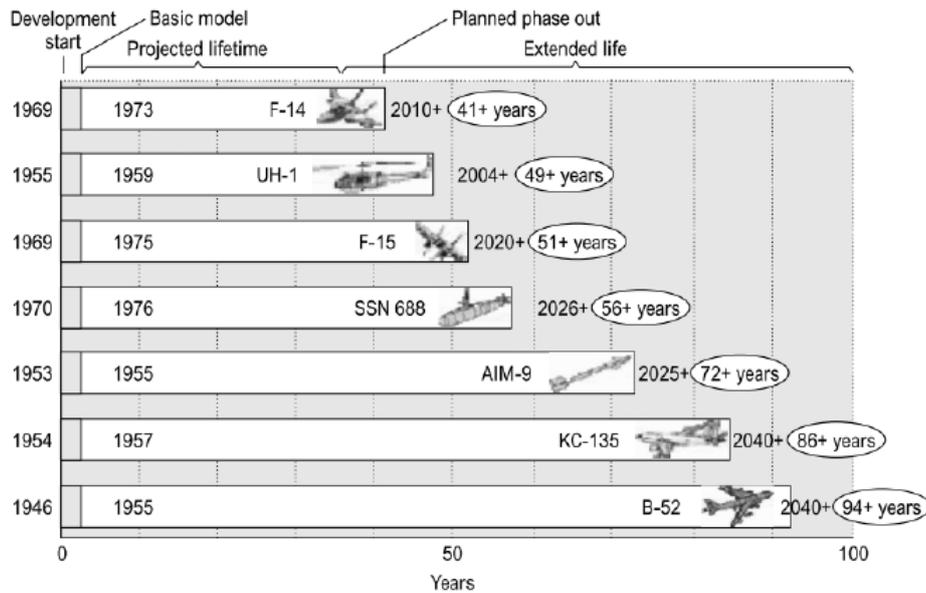


FIGURE 1.1 – Durée de vie prévisible des systèmes d'armes, (Stogdill, 1999).

SIEMENS a augmenté à partir de 2012, le ratio de ce total qui devient obsolète chaque année continue de suivre le même schéma symétrique. Une telle symétrie dans les données suggère qu'il existe un système en place pour produire ce comportement de manière constante. On pourrait spéculer sur une stratégie de vente, alors que considérer les produits comme obsolètes est entièrement l'apanage de SIEMENS.

Dans certains systèmes, le changement d'un composant ou d'une fonction est nécessaire pour s'adapter à la nouvelle exigence du client. Ces composants ont alors un cycle de vie plus court que celui prévu lors de leur conception. On constate alors qu'il existe une relation entre le cycle de vie et l'obsolescence. Il est par définition la période de temps pendant laquelle le produit est disponible sur le marché pour la consommation (Meng u. a., 2014). Il comporte 6 phases. La dernière phase est l'obsolescence du composant au cours de laquelle le fournisseur arrête la production. Si un composant atteint ce stade, les industries qui l'utilisent dans son processus de production reçoivent un avis de son producteur. Dans cette situation, les industries sont confrontées à des problèmes majeurs de gestion de l'obsolescence. Il est nécessaire de connaître la capacité du système qui contient un élément obsolète à continuer à fonctionner. Connaître la propagation de l'effet d'obsolescence sur le reste du système et savoir comment les autres sous-systèmes vont réagir fait partie des actions à mener.

Si l'obsolescence affecte un composant à son tour, elle peut avoir un impact sur tous les composants avec lesquels il interagit (par le biais d'échanges de données ou d'énergie par exemple). Les conséquences de l'obsolescence se propagent donc en raison de dépendances qui peuvent être modélisées en analysant l'architecture du système. Il devient, ainsi, nécessaire de pouvoir limiter cette propagation et son effet sur l'ensemble du système. Pour être efficace,

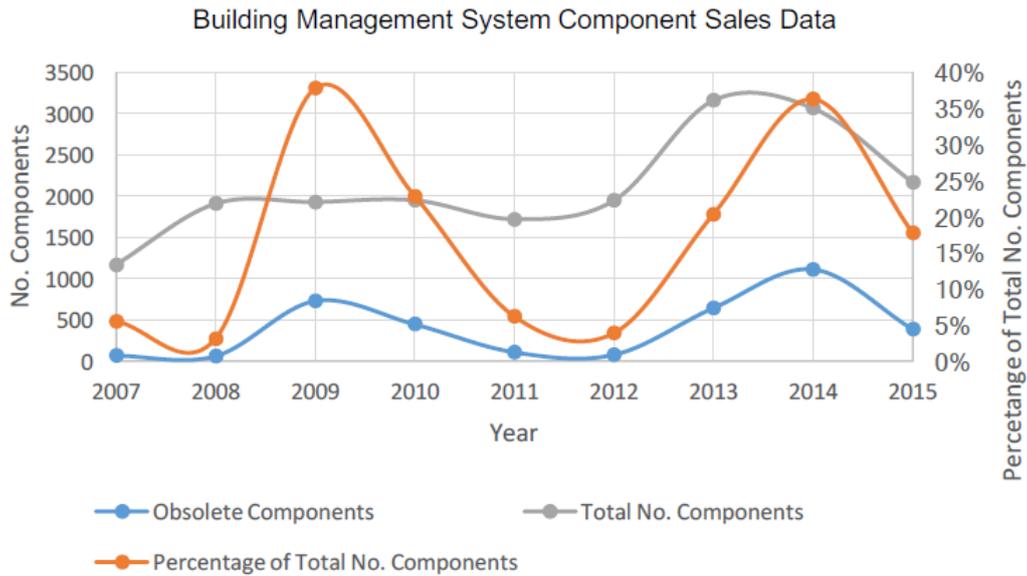


FIGURE 1.2 – Analyse de la stratégie de vente des OEM, (Mulholland, 2017).

toute stratégie de remédiation proactive doit être basée sur l’architecture du système, c’est-à-dire être capable d’identifier les entités les plus sensibles et de prévoir toute propagation d’obsolescence. Souvent, après l’intégration des modifications de conception, il est nécessaire de s’assurer que le système fournit toujours ses services conformément aux exigences. Pour certains systèmes critiques, après la résolution du problème de l’obsolescence (par exemple en le remplaçant par un composant similaire), les systèmes doivent être certifiés par des organismes indépendants. Il est tout à fait raisonnable de postuler que les efforts requis pour résoudre les problèmes d’obsolescence doivent être réduits au minimum. Il est préférable qu’un système soit conçu de manière à garantir que les exigences (fonctionnelles, performances, contraintes et qualité) sont respectées même en présence d’une obsolescence potentielle.

1.2 Problématique de la thèse

Un examen attentif de la littérature scientifique et des normes internationales montre qu’il existe une abondance des travaux sur la gestion de l’obsolescence, mais peu de travaux notamment méthodologiques existent en terme de conception de systèmes prenant en compte l’obsolescence. Par exemple, le guide SD-22 (Office, 2016) dans sa dernière version (publiée en 2016) ne contient que des recommandations pour la conception de systèmes ; aucun outil ou méthode n’est défini.

Les technologies, qui évoluent à un rythme de plus en plus rapide, notamment dans les secteurs de l’électronique et de l’informatique, conduisent inévitablement les systèmes à faire face aux problèmes générés par l’obsolescence. Il est évident que le fabricant doit être en mesure de concevoir des systèmes de manière à ce qu’un problème d’obsolescence ait le moins possible de

conséquences dommageables ou indésirables. Le fait qu'un système reste aussi insensible que possible aux changements imposés par la résolution de l'obsolescence est appelé résilience. Elle détermine la capacité du système à continuer à fournir ses services tout en ayant au moins un composant, une fonction ou une technologie obsolète. Nous nous concentrons sur la résilience d'un système aux changements et notamment ceux liés à l'obsolescence. Le présent travail est une contribution à la prise en compte de l'obsolescence dès les premières étapes de la conception des systèmes. Les problématiques poursuivies sont alors : **(P.1) de cartographier et de quantifier les effets possibles et la propagation de l'obsolescence potentielle ou avérée et (P.2) de proposer une méthodologie pour assurer une conception résiliente à l'obsolescence.** Alors, la méthodologie envisagée est basée sur l'exploitation des dépendances identifiées au sein du système par les modèles obtenus suite à l'application d'une méthodologie d'ingénierie système.

La toute première étape consiste à expliciter les dépendances en utilisant la modélisation de l'architecture du système. Nous avons choisi l'une des méthodologies d'ingénierie des systèmes les mieux établies, ARCADIA, développée par Thales. La raison, entre autres, est qu'ARCADIA fournit une feuille de route claire et détaillée pour la modélisation des systèmes à différents niveaux. De plus, elle est soutenue par un environnement de modélisation open source : logiciel Capella (Roques, 2017). Elle permet de contrôler la validité des modèles à travers différentes étapes de modélisation. Le modèle de dépendances est ensuite transformé

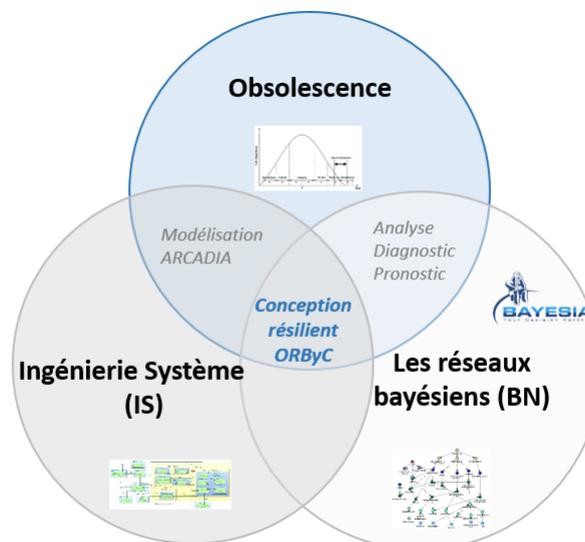


FIGURE 1.3 – Le contexte de travail de recherche

en un graphique probabiliste orienté ... un réseau bayésien appartenant aux modèles graphiques probabilistes (Ben-Gal, 2008). Ces réseaux offrent la possibilité de mener diverses études quantitatives (diagnostiques, pronostiques et analyse tout azimut). La méthodologie proposée est appelée Obsolescence Resilience By Construct, ORBYC. Elle est appliquée à l'étude du système de signalisation ferroviaire actuellement déployé en France. ORByC com-

bine des concepts issus de trois domaines : l'obsolescence, l'ingénierie des systèmes et les réseaux bayésiens (Figure.1.3).

1.3 Structuration de la thèse

La structure générale de ce rapport de thèse est représentée dans la Figure. 1.4. Celle-ci permet, en l'occurrence, de choisir différentes manières de lire le rapport. Ce document est structuré en six chapitres : le présent chapitre rappelant le contexte et problématique, un deuxième pour l'”État de l'art”, un chapitre sur la ”Propagation de l'obsolescence”, un suivant pour présenter et expliquer ”La méthodologie ORByC”, un chapitre sur ”la résilience à l'obsolescence” et enfin le dernier portant sur ”Étude de cas”. Une conclusion générale clôturera ce rapport.

Plus précisément, le chapitre 2 présente l'état de l'art en 3 parties principales relatives aux différents concepts abordés dans cette thèse et aux communautés de recherche qui s'y

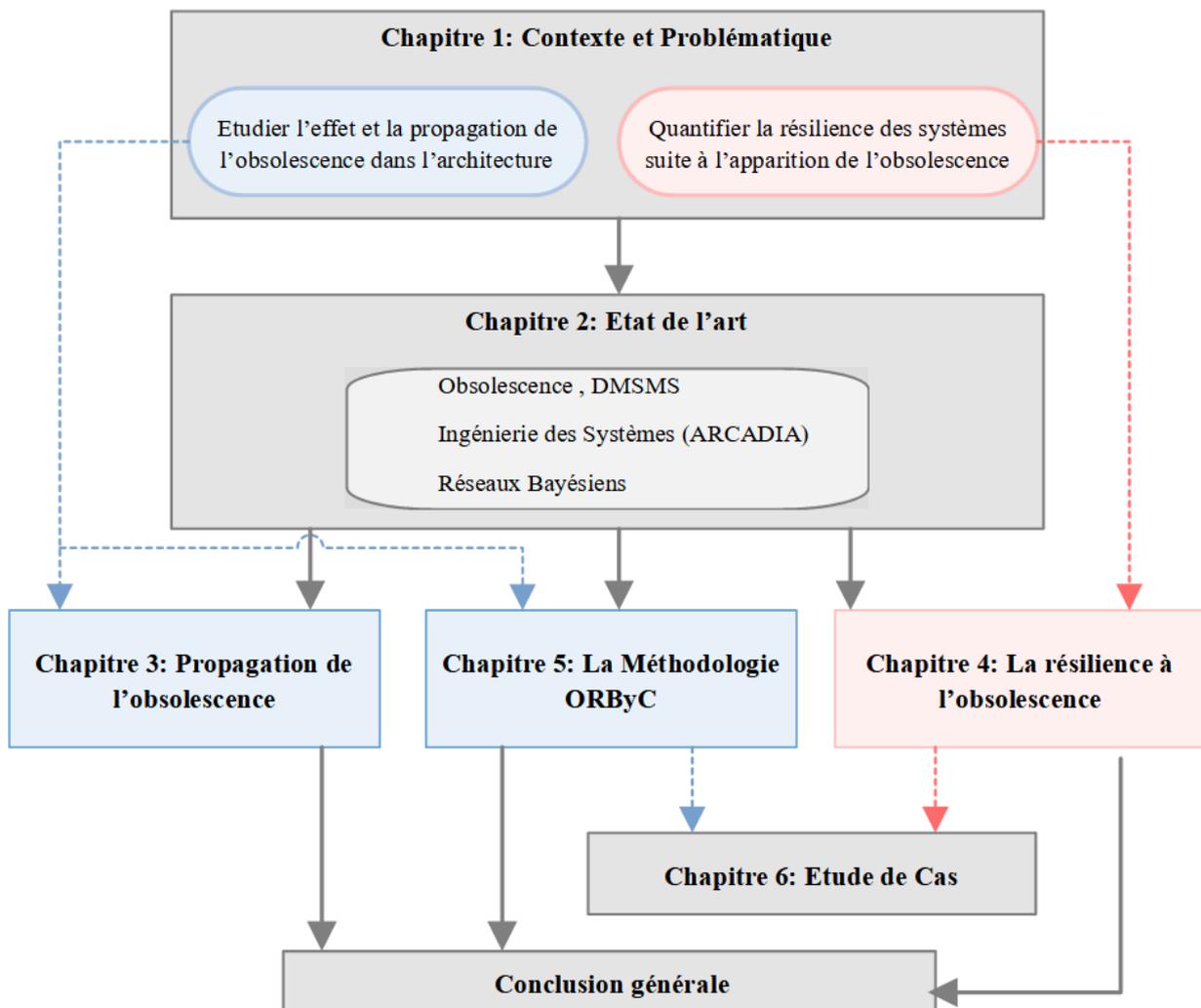


FIGURE 1.4 – Structuration de la thèse

intéressent. La première partie se concentre sur les notions de l'obsolescence et la raréfaction (DMSMS en anglais) en explicitant la différence entre eux. Dans la deuxième partie, nous présentons les outils et les méthodologies de l'ingénierie des systèmes, en se concentrant à la fin, sur la méthodologie choisie dans ce travail : ARCADIA. La troisième partie est une description du graphe utilisé dans l'étude de la propagation de l'obsolescence qu'est le réseau bayésien. À la fin de ce chapitre, une conclusion de l'état de l'art résume les points clés des trois parties.

Nous développons et décrivons dans le chapitre 3 les possibles propagations de l'obsolescence dans l'architecture de produit et système et dans la chaîne logistique. Nous avons produit ce travail parce que c'est crucial d'en comprendre la mécanique pour pouvoir, dans le cadre de la méthodologie, faire des analyses objectives de cause à effet en terme de performance et de freins à l'obsolescence. De plus nous y précisons les sources potentielles de l'obsolescence. Ce chapitre apporte une contribution au premier problème (P.1) posé ci-dessus.

Le chapitre 4 contient l'étude de la résilience à l'obsolescence. Des définitions des différents types de résilience sont présentées pour écarter tout risque de confusion terminologique. Un vecteur de résilience est proposé nous permettant de quantifier la résilience d'un tel système au travers de la méthodologie ORByC. Ce chapitre est basé sur la deuxième problématique (P.2) de notre travail de recherche.

Une méthodologie structurée est proposée au chapitre 5 (ORByC). Elle a pour but de construire des réseaux bayésiens basés sur les modèles d'ARCADIA. Par conséquent, des règles de construction et de passage sont détaillées et commentées pour permettre l'adoption facile de notre méthodologie.

Dans le chapitre 6, nous présentons l'étude de cas qui illustre l'application de la méthodologie ORByC et la quantification de la résilience proposées dans les chapitres 4 et 5, et ce sur un cas industriel dans des conditions réelles de résolutions de problèmes.

Le rapport de thèse se termine par une conclusion sur les principales contributions et résultats obtenus au cours de notre travail de thèse donnant, par ailleurs, les principales perspectives de recherche quant aux travaux futurs.

1.4 Publications

Nous présentons ci-dessous la liste des publications scientifiques relatives au travail effectué lors du développement de l'approche ORByC.

Article de revue

- **Soltane, A.**, Addouche, S. A., Zolghadri, M., Barkallah, M., Haddar, M. (2021), A methodology to determine the resilience of a system to obsolescence during the design phase, **Research in Engineering Design journal (IP 2.710, 2020)**, <https://doi.org/10.1007/s00163-021-00373-w>

- **Soltan, A.**, Addouche, S. A., Zolghadri, M., Barkallah, M., and Haddar, M. (2019). System Engineering for dependency analysis-a Bayesian approach : application to obsolescence study. **Procedia CIRP**, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.253>.

Article de conférence

- **Soltan, A.**, Addouche, S. A., Zolghadri, M., Barkallah, M., and Haddar, M. (2018). Obsolescence paths through the value chain. **Procedia Manufacturing**, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.169>.
- **Soltane, A.**, Addouche, S. A., Zolghadri, M., Barkallah, M., and Haddar, M. (2021), Design for Obsolescence Resilience. 8th International Conference on Research into Design 7-9 January 2021 IDC School of Design IIT, Bombay, India, https://doi.org/10.1007/978-981-16-0084-5_20.
- **Soltane, A.**, Addouche, S. A., Zolghadri, M., Barkallah, M., and Haddar, M. (2021), L'ingénierie des systèmes et les réseaux bayésiens pour la conception résiliente à l'obsolescence, CIGI QUALITA, 2021

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Introduction

Au cours du développement des produits et des systèmes, des changements dans la conception sont généralement nécessaires, en fonction de l'évolution de la demande des clients et de la disponibilité des matières et des composants utilisés dans leur fabrication (Singh und Sandborn, 2006). Les évolutions technologiques ont entraîné une accélération du rythme de lancement des produits. De nouveaux composants aux performances améliorées, de haute qualité et dotés de fonctionnalités supplémentaires sont souvent introduits dans un grand nombre de domaines industriels (l'électronique, la défense, l'automobile...) (Jennings u. a., 2016). L'évolution rapide des technologies et la brièveté des cycles de vie des produits deviennent à la fois un problème et une opportunité pour les fabricants. Ils doivent intégrer de nouveaux composants, matières et procédés pour maintenir leur position sur le marché face à leurs concurrents (Singh und Sandborn, 2006).

Ces changements affectent les systèmes et peuvent générer des difficultés dans leur fonctionnement. Notre travail sert ainsi à étudier ces changements et à déterminer la résilience du système suite à la mise en place de ces changements. Dans un premier temps, nous devons définir l'obsolescence et déterminer les causes possibles de son apparition. C'est l'objectif de la première partie de ce chapitre. Pour étudier son impact sur les performances et le fonctionnement du système, nous devons étudier son effet sur l'architecture du système. Notre première étape consiste à déterminer et à modéliser cette architecture. Pour ce faire, nous utilisons une méthodologie d'ingénierie système. La troisième partie étudie l'importance de l'IS dans notre travail et fournit une liste d'outils et de méthodologies pour la modélisation des systèmes complexes. Les modèles de l'IS donnent une description détaillée du système avec les différentes dépendances mais ne peuvent pas être utilisés pour une étude de propagation d'obsolescence. Nous utilisons des matrices de dépendances qui peuvent être transformées en réseaux et graphes simulables. Ces matrices sont bien définies dans la section quatre. La dernière partie est une description des réseaux probabilistes qui sont construits à partir de ces matrices. Parmi ces graphes, nous utilisons des réseaux bayésiens pour étudier l'effet d'un changement créé pour gérer l'obsolescence sur l'architecture du système.

2.2 Obsolescence

L'une des premières références à l'obsolescence remonte aux années 1970 dans la recherche de Warmington (1974). Ce terme est utilisé lorsque les ingénieurs rencontrent des problèmes majeurs avec des stocks obsolètes et inutilisables en production, ce qui nécessite de minimiser ces coûts élevés (Cobbaert und Van Oudheusden, 1996), (Masters, 1991). Aujourd'hui, l'obsolescence fonctionnelle, technique et stylistique rend obsolètes 3% des produits électroniques dans le monde (QTEC, 2016). Il est essentiel de produire des changements tout au long du cycle de vie des produits en raison de l'instabilité de la disponibilité des composants qui les

constituent et de l'évolution des besoins des clients. L'innovation et le progrès technologique sont devenus de grands défis à l'obsolescence ; " L'avertissement de l'innovation est l'obsolescence - le côté sombre des progrès rapides qui profitent à une grande partie de la société " (Gravier und Swartz, 2009). En d'autres termes, une technologie innovante signifie que l'ancienne peut être obsolète.

2.2.1 Définitions de l'obsolescence

Un composant, un produit, des services, un logiciel ou un sous-système sont obsolètes s'ils ne répondent pas aux nouvelles exigences des clients (Thompson u. a., 1995). Ils pourraient offrir les fonctionnalités avec lesquelles ils ont été conçus, mais par rapport aux nouvelles technologies, elles sont considérées comme insuffisantes et insatisfaisantes. L'Oxford English Dictionary (Thompson u. a., 1995) définit le nom "obsolescence" comme "l'état d'être qui se produit lorsqu'un objet, un service ou une pratique n'est plus désiré, même s'il est encore en bon état de fonctionnement". En d'autres termes, un produit ou un système est obsolète lorsqu'il ne répond plus à la fonctionnalité attendue par les clients. L'obsolescence affecte le matériel et les logiciels. Elle "se réfère aux matières , pièces, dispositifs, logiciels, services et processus qui ne peuvent plus être obtenus auprès de leur fabricant ou fournisseur d'origine" (Bartels u. a., 2012). Une liste des définitions qui existent dans la littérature est fournie dans le Tableau. 2.1.

L'obsolescence des composants et des sous-systèmes peut être fonctionnelle, technique ou liée au style. Elle touche pratiquement tous les domaines d'activité (Jennings u. a., 2016). Le groupe d'experts dans (Group, 2016) propose une définition très pratique : "L'obsolescence se présente de deux façons : (i) l'article n'est plus adapté aux demandes actuelles ou (ii) l'article n'est plus disponible auprès du fabricant d'origine, par exemple en raison de contraintes économiques".

Nous proposons une définition de l'obsolescence :

L'obsolescence est l'état dans lequel le composant, la fonction ou le système n'offre plus ses services aux clients au niveau de performance attendu, même s'il demeure opérationnel

Il y a une différence entre deux caractéristiques d'élément : "obsolète" et "obsolescent". Un article est considéré comme obsolète" dès qu'il n'est plus disponible auprès du fabricant (d'origine)" et il est considéré comme obsolescent "immédiatement après la publication de l'information sur une discontinuité jusqu'à ce que l'article soit obsolète" (Seuren u. a., 2018).

TABLE 2.1 – Définitions de l'obsolescence

Auteurs	Définitions de l'obsolescence
Sandborn P	" La perte ou la perte imminente des fabricants d'articles d'origine ou des fournisseurs d'articles ou de matières premières (Sandborn, 2008b)."

Feldman K. et Sandborn P Waldman M	” La perte ou la perte imminente de pièces ou de fournisseurs de pièces ou de matières premières (Feldman und Sandborn, 2007).”
	” L’état de ne plus être nécessaire parce que quelque chose de nouveau ou de plus efficace a été inventé (Waldman, 1996).”
Romero Rojo	” L’obsolescence est l’indisponibilité de pièces ou de services qui étaient auparavant disponibles et qui auraient pu être retirés pour de nombreuses raisons : techniques, financières, juridiques et autres (Romero Rojo, 2011).”
IEC 62402 : 2007	” Transition de la disponibilité du fabricant d’origine à l’indisponibilité”
Singh P et Sandborn P	” Une pièce devient obsolète lorsqu’elle n’est plus fabriquée, soit parce que la demande a baissé à un niveau assez bas pour que les fabricants ne puissent plus continuer à la fabriquer, soit parce que les matières ou les technologies nécessaires à sa fabrication ne sont plus disponibles (Singh u. a., 2004).”
TQ-Systems GmbH - Obsolescence Management	” L’obsolescence est l’absence de livraison par la source d’approvisionnement initiale et le manque de disponibilité qui en résulte en raison de diverses influences (Gravier und Swartz, 2009).”
Bartels et al	- L’obsolescence est l’état où une pièce, un système ou un service n’est plus supporté ou souhaité (Bartels u. a., 2012). - L’obsolescence logique : L’article n’est plus en production en raison de l’absence de pièces, de matières , de processus, de machines, de connaissances ou de logiciels nécessaires à la fabrication ou au soutien de l’article. - Obsolescence fonctionnelle : L’article ne répond plus aux exigences opérationnelles actuelles ou à la demande fonctionnelle, mais il continue à fonctionner et à être produit comme prévu à l’origine (Bartels u. a., 2012).
Jaarsveld and Dekker	L’obsolescence est une partie du stock qui n’est plus utilisée, parfois appelée obsolescence de l’inventaire (Van Jaarsveld und Dekker, 2011).

2.2.2 Obsolescence et diminution des sources de fabrication et des pénuries de matières (DMSMS)

Diminution des sources de fabrication et des pénuries de matières, DMSMS en abrégé, est défini dans ([SD-22, 2016](#)) comme ”la perte, ou la perte imminente, de fabricants ou de fournisseurs d’articles, de matières premières ou de logiciels”. Les auteurs [Zolghadri u. a. \(2018\)](#) soulignent la différence et la similarité entre l’obsolescence et le DMSMS. Selon eux, ”l’obsolescence concerne les caractéristiques des articles alors que le DMSMS se concentre sur l’approvisionnement des articles. Le DMSMS est une conséquence de la raréfaction tandis que l’obsolescence est une conséquence de l’inutilité”. Bien que ces deux concepts diffèrent à certains aspects, il existe des techniques et des méthodes similaires pour les traiter [SD-22 \(2016\)](#). D’autres définitions de la DMSMS se trouvent dans le Tableau. [2.2](#).

Le DMSMS est l’interruption (possible) du processus d’approvisionnement tout au long de la chaîne de valeur ; elle signifie qu’une offre devient, rare. Le DMSMS est le résultat du processus de raréfaction. Ce processus est déclenché par des risques incontrôlés ou des ca-

TABLE 2.2 – Définitions de la DMSMS

Auteurs	Définitions de DMSMS
Bureau du programme de normalisation de la défense	” Un problème de diminution des sources de fabrication et de pénurie de matériel (DMSMS) est la perte, ou la perte imminente, de fabricants ou de fournisseurs d’articles, de matières premières ou de logiciels. Le département de la défense (DoD) perd un fabricant ou un fournisseur lorsque ce fabricant ou ce fournisseur cesse la production et/ou le soutien des articles, des matières premières ou des logiciels nécessaires ou lorsque la fourniture de matières premières n’est plus disponible (SD-22, 2016).”
Raymond S. Nelson III et Peter Sandborn	” Le DMSMS signifie qu’en raison de la durée de fabrication et de support du système, ainsi que des prolongations imprévues de la durée de support, les composants nécessaires deviennent indisponibles (ou du moins non disponibles auprès de leur fabricant d’origine) avant que la demande du système ne soit épuisée (Nelson III und Sandborn, 2012).”

tastrophes naturelles (par exemple, un tremblement de terre (Meahl, 2016)), des accidents (par exemple, un incendie en 2015 (Meahl, 2016)), l’instabilité géopolitique (par exemple, une guerre (Meahl, 2016)) ou des risques contrôlés. Il s’agit essentiellement de problèmes logistiques tels que les changements de mode de transport, les inspections portuaires au passage des frontières, les grèves et les retards. Dans certains cas, l’augmentation inattendue des demandes des clients rend l’entreprise incapable de satisfaire ces commandes. Cette situation entraîne des pénuries qui réduisent le flux de matières dans la chaîne d’approvisionnement.

Donc l’obsolescence est lorsque l’article n’est plus adapté aux demandes actuelles et le DMSMS est le fait qu’un l’article n’est plus disponible auprès de l’OEM (Original Equipment Manufacturer), voir le Tableau. 2.3. Certaines recherches considèrent le DMSMS comme un type d’obsolescence. Par exemple dans (Nelson III und Sandborn, 2012) : ”Le type d’obsolescence abordé dans ce document est appelé diminution des sources de fabrication et pénurie de matériel (DMSMS)”. Peu d’études les considèrent comme différentes. Le Defense Standardization Program Office part du principe qu’”un article peut être obsolète, mais s’il est toujours en production, il n’y a pas de problème de DMSMS tant que la capacité de production ou la capacité peut répondre à la demande” (SD-22, 2016). Dans (Seuren u. a., 2018), l’auteur détermine une différence dans le domaine d’utilisation : le DMSMS est utilisé presque dans l’industrie de la défense et l’obsolescence est surtout associée à l’industrie des biens d’équipement.

2.2.3 Identification des facteurs d’obsolescence

Les causes de l’obsolescence sont nombreuses. La principale est le progrès technologique (Merola, 2006) qui peut être favorisé par la concurrence des entreprises (Bradley und Dawson, 1998). Merola (2006) souligne le manque de soutien de la part du fournisseur. Dans le cas

TABLE 2.3 – Obsolescence et DMSMS

Phénomène	S'intéresse à	Modélisation de la
Obsolescence	Caractéristiques du produit/système et architecture	Adéquation
DMSMS	Caractéristiques de la chaîne d'approvisionnement, caractéristiques de la fabrication	Disponibilité

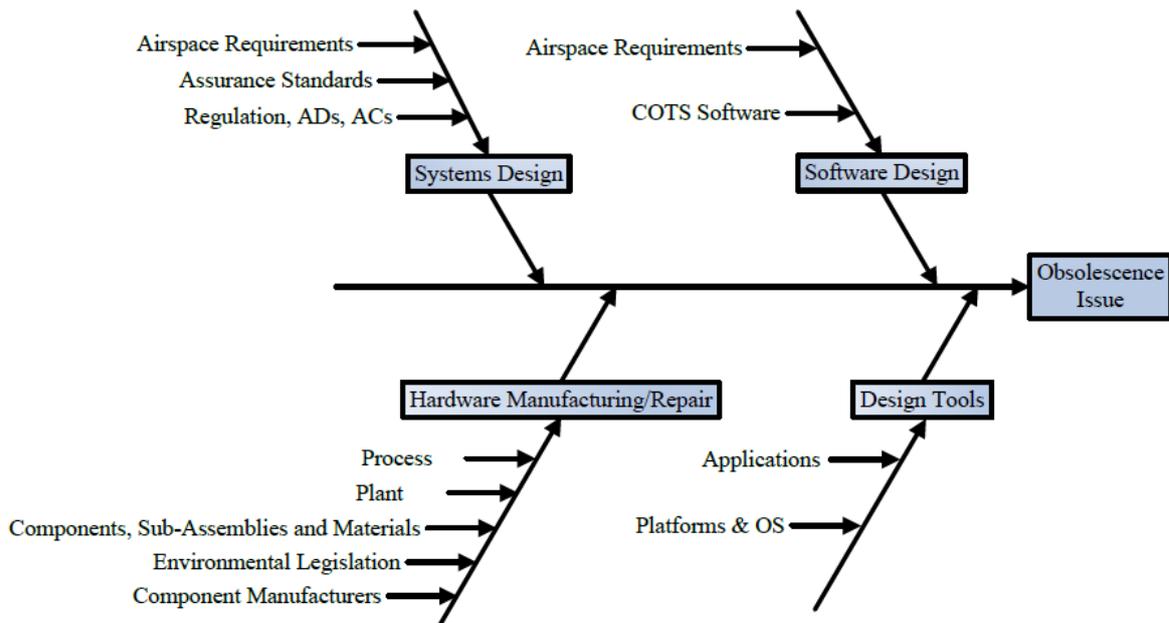


FIGURE 2.1 – Analyse Cause-Effet d'obsolescence (Wilkinson, 2015)

de fusions et d'acquisitions, les organisations peuvent avoir besoin de modifier leurs matériels et logiciels pour être compatibles avec l'équipement utilisé dans l'organisation acquéreuse (Bradley und Dawson, 1998). Une autre raison est l'incompatibilité des pièces. Le nouveau matériel ne fonctionne pas avec les anciens composants matériels. En outre, différentes versions d'un même logiciel d'application peuvent être incompatibles. Cela obligerait l'organisation à cesser d'utiliser une version incompatible, le plus souvent l'ancienne version (Whitley, 2001). Wilkinson (2015) définit quatre catégories de raisons pour lesquelles l'obsolescence peut être identifiée : la conception de logiciels, la conception de systèmes, la fabrication/réparation de matériel et les outils de conception. Enfin, (Bartels u. a., 2012) considèrent qu'une source importante d'obsolescence est celle liée à la législation gouvernementale et aux politiques environnementales. C'est le cas, par exemple, du nouveau règlement européen n° 631/2019, adopté le 17 avril 2019, qui fixe des normes de performance en matière d'émissions de CO2 pour les nouveaux véhicules utilitaires légers et les nouvelles voitures particulières et abroge les règlements (CE) n° 443/2009 et (UE) n° 510/2011.

La Figure. 2.1 résume les causes d'obsolescence appliquées à l'avionique de défense. Les problèmes d'obsolescence ont deux sources principales (Wilkinson, 2015). La première source

est liée à l'offre, causée par la chaîne d'approvisionnement ascendante. La seconde source est liée à la demande, causée par la gestion et la régulation de l'espace aérien descendant. Un problème d'obsolescence peut survenir en raison de l'interruption de la production dans la chaîne d'approvisionnement de composants, d'outils ou de plates-formes, de sous-ensembles, de modifications des règles de navigabilité et de la législation ou des normes. La cause profonde du problème de la chaîne d'approvisionnement est que l'industrie aéronautique n'est pas intégrée verticalement et dépend d'un grand nombre de produits informatique standard (off-the-shelf (COTS)), de sorte qu'il existe une inadéquation dans le cycle de vie technologique entre la base d'approvisionnement et la fabrication des produits avioniques, (Wilkinson, 2015). La chaîne d'approvisionnement des composants est basée sur un cycle technologique commercial de quelques années (2 à 7 ans), alors que le cycle de vie des avions et de l'avionique est plusieurs fois plus long (20 ans ou plus).

2.2.4 Stratégies de remédiation de l'obsolescence

Afin de préserver les produits à longue durée de vie et de minimiser les coûts, il est essentiel de mettre en place des stratégies pour gérer et atténuer l'obsolescence. Malgré la distinction faite dans la section 2.2.2, les travaux de recherche se réfèrent à la gestion de l'obsolescence dans son ensemble incluant simultanément l'obsolescence et le DMSMS.

Honeywell met en œuvre un processus qui est documenté par des procédures appliquées dans toute l'entreprise par le système d'assurance qualité. La Figure.2.2 montre ce processus. Par le biais de divers services d'abonnement, Honeywell reçoit des notifications d'obsolescence imminente, utilise un outil de suivi de la gestion de l'obsolescence pour attribuer les responsabilités de la réalisation de la méthode de résolution et suit chaque cas jusqu'à son achèvement. De plus, un outil de suivi est utilisé pour comptabiliser et gérer les différents stocks de composants obsolètes localisés dans plusieurs sites de fabrication, estimer et gérer les derniers achats (last time buy : LTB) afin de contrôler et de répartir l'épuisement des stocks au niveau mondial.

Sandborn (2008a) définit 3 stratégies pour gérer l'obsolescence : réactive, proactive et stratégique. Les stratégies réactives consistent à trouver des méthodes pour traiter un problème d'obsolescence avéré. La gestion réactive est faite pour les événements d'obsolescence inattendus ; une solution rapide et immédiate doit être trouvée. Les gestions les plus citées sont les suivantes : (i) le remplacement des composants, (ii) l'achat à vie : achat de suffisamment de pièces pour répondre aux exigences du cycle de vie du produit auprès du fabricant de pièces d'origine (Bartels u. a., 2012), (iii) l'utilisation du stock existant, (iv) l'émulation : création de composants à partir des fiches techniques (Bartels u. a., 2012), (v) marché des pièces de rechange : les fabricants de pièces fournissent un soutien à la demande de pièces une fois que le fabricant d'équipements d'origine a cessé de les produire (Bartels u. a., 2012), (vi) pièces de rechange : utilisation d'une pièce dont les performances correspondent ou dépassent celles de la pièce qu'elle remplace (Tomczykowski, 2003).

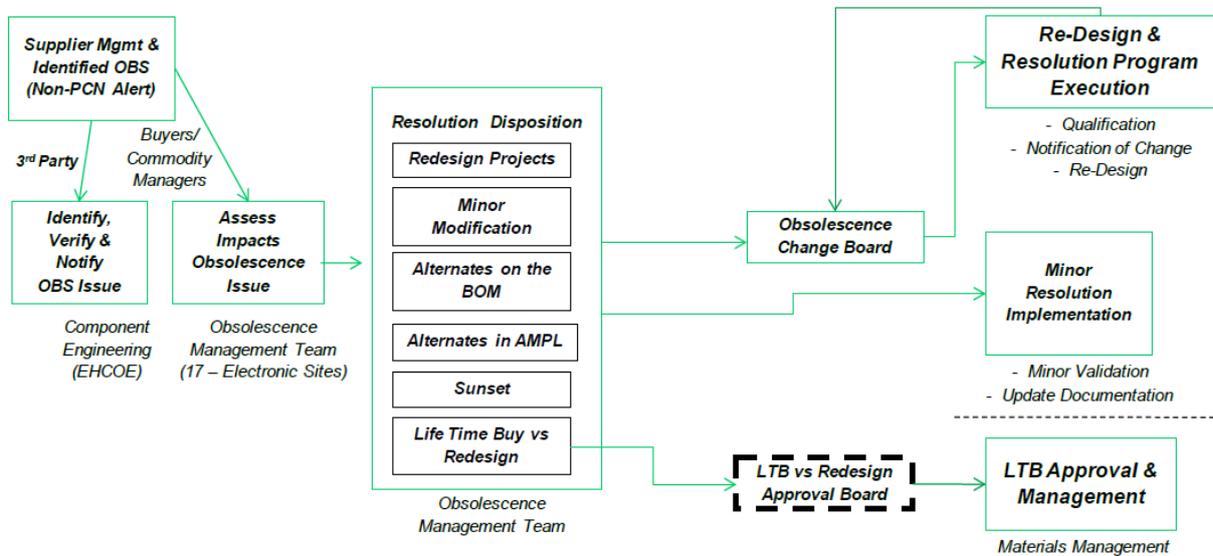


FIGURE 2.2 – Management de l’obsolescence chez Honeywell (Wilkinson, 2015)

Les stratégies proactives de remédiation de l’obsolescence visent à réduire la possibilité d’apparition d’une obsolescence inattendue en la prévoyant. Dans ce cas, l’obsolescence n’a pas encore été produite, mais sa date possible est prévue. En utilisant le cycle de vie des composants, Solomon u. a. (2000) prévoient la zone probable d’obsolescence à l’aide d’une méthode en 7 étapes, voir Figure 2.3. L’idée essentielle de cette méthode est la collecte de données pour déterminer la courbe du cycle de vie d’un tel produit. Ensuite, en utilisant la fonction fournie par cette courbe, on estime la date d’obsolescence.

En utilisant la programmation dynamique stochastique (SDP), Hu und Bidanda (2009) développent un processus d’évolution du cycle de vie des produits afin de modéliser les prises de décision successives tout au long de la gestion du cycle de vie des produits. Zheng u. a. (2015) introduisent des modèles mathématiques pour identifier le plan de mise à jour de la conception afin de minimiser le coût total. Ils proposent notamment des indications sur le moment où les mises à jour de la conception doivent être effectuées. Ils déterminent quels composants obsolètes/non obsolètes doivent être remplacés au moment d’une mise à jour particulière de la conception. D’autres approches proactives évaluent le risque d’obsolescence, comme la pratique proposée par Romero Rojo (2011). Cette méthode est appelée ”L’évaluation du risque d’obsolescence pour la nomenclature (BoM)”. Son idée importante est d’analyser le processus d’évaluation des risques pour chaque composant de la nomenclature. Les facteurs clés qui doivent être analysés dans le processus d’évaluation des risques pour chaque composant de la nomenclature sont : le nombre de fabricants, les années avant la fin de vie, le stock disponible, le taux de consommation et la criticité de l’impact opérationnel. Pour les composants à très haut risque, une analyse plus détaillée est nécessaire pour éclairer les décisions concernant les stratégies de remédiation les plus appropriées.

Les solutions réactives sont généralement trop coûteuses. Herald u. a. (2007) ont montré

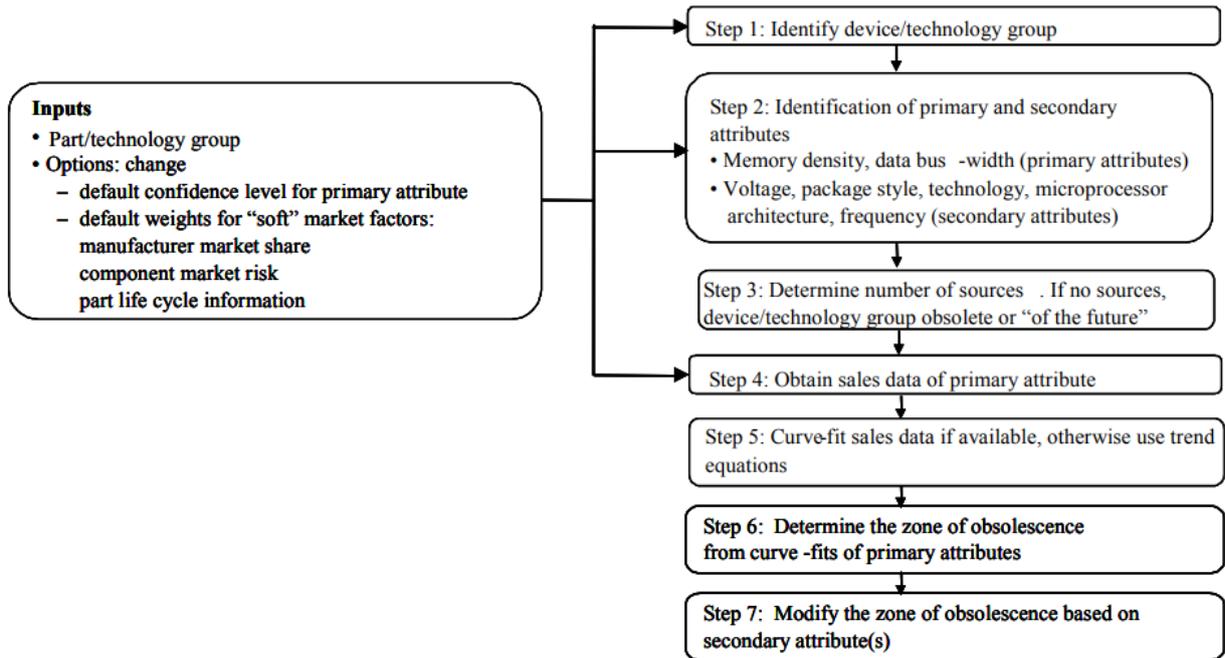


FIGURE 2.3 – Méthodologie de prévision du cycle de vie (Solomon u. a., 2000)

que pour réduire les coûts des solutions, il est nécessaire d’appliquer les approches de remédiation proactives. Il faut donc trouver un bon compromis entre le coût et la probabilité d’obsolescence ; si la probabilité est élevée, Romero Rojo (2011) recommande d’appliquer la solution réactive parce qu’elle est plus rapide. Dans le cas contraire, il faut minimiser les coûts en choisissant une solution proactive.

Le troisième type de gestion de l’obsolescence est stratégique. Il propose un plan à long terme et consiste à réduire le risque d’obsolescence dès les premières phases de développement du système tout en utilisant les données des prévisions, de la logistique et des dates d’obsolescence. L’une de ces stratégies est la planification du rafraîchissement de la conception dans (Singh und Sandborn, 2006). Elle implique un changement du système pour le rendre durable. Meng u. a. (2014) proposent également la reconception comme stratégie de gestion de l’obsolescence à long terme ; elle est utilisée comme référence pour les modifications du système afin de maintenir les fonctionnalités du système disponibles et de maintenir la production en cours. Cette technique peut nécessiter une revalidation et des tests, en particulier si la pièce est utilisée dans les systèmes militaires ou avioniques.

Il existe de nombreux types de résolutions différentes pour résoudre un problème d’obsolescence. Le Tableau. 2.4 contient les définitions de chaque type de résolution. Ces résolutions se répartissent en trois grandes catégories : le matériel existant (logistique), les substituts (ingénierie) et la refonte (ingénierie) (SD-22, 2016). Ces grandes catégories indiquent le niveau et la quantité de recherche nécessaire pour mettre en œuvre une résolution. À mesure qu’un programme progresse dans les différentes catégories de résolution, la quantité de recherche et le nombre d’éléments de coût nécessaire pour mettre en œuvre une résolution augmentent. Les résolutions relevant de la catégorie du matériel existant (logistique) nécessitent des actions

TABLE 2.4 – Résumé des types de solutions couramment utilisées (SD-22, 2016).

Solution	Définition
Aucune solution requise	Il est déterminé que la question du DMSMS n'aura pas d'impact sur le système car, par exemple, le stock est suffisant pour répondre aux besoins du système.
Partie approuvée	La question de l'obsolescence est résolue par l'utilisation d'articles déjà approuvés sur le dessin et toujours en production.
Achat à vie	Une quantité suffisante de l'article est achetée pour maintenir le produit jusqu'au prochain rafraîchissement de sa technologie ou l'arrêt de l'assemblage hôte. Comme cette solution utilise un article approuvé, aucun essai ou modification de dessin n'est nécessaire. La source d'approvisionnement peut être un stock résiduel du fabricant d'origine, un stock en rayon de distributeurs, du matériel appartenant au sponsor, etc. Les coûts d'emballage, de stockage et de transport doivent être pris en compte dans l'analyse de rentabilité pour le choix des solutions.
Extension de la production ou du soutien	Le fournisseur est incité à continuer à fournir les articles obsolètes. Cela peut impliquer des accords à long terme pour l'achat de quantités spécifiques de pièces. Les coûts uniques doivent être inclus dans tout calcul de coût et d'évitement de coûts.
Substitution simple	L'article est remplacé par un article existant qui répond à toutes les exigences sans modification de l'article ou de son assemblage supérieur suivant (ASS) et ne nécessite qu'une qualification minimale. Les coûts associés sont en grande partie administratifs.
Substitution complexe	Un article de remplacement qui a des spécifications différentes, mais qui ne nécessite aucune modification du produit source ou de l'ASS, fait l'objet de recherches et est validé.
Réparation, remise à neuf ou récupération	La question de l'obsolescence est résolue par la mise en place d'un programme de réparation ou de remise à neuf de l'article ou de l'ensemble existant, qu'il s'agisse d'une réparation en dépôt, d'un contrat de réparation avec le fabricant d'origine ou de l'assistance d'un tiers.
Développement d'une nouvelle source	Un produit de remplacement est développé qui répond aux exigences du produit original sans affecter l'ASS. Des travaux d'ingénierie ou d'autres activités de développement non récurrents seront probablement nécessaires. Le nouveau produit peut être une émulation, un produit d'ingénierie inverse, ou un produit développé en remplacement en utilisant un fabricant différent, mais les conceptions et les processus de fabrication d'origine.
Reconception de l'ASS	L'ASS de l'article concerné doit être modifié. Seul l'ASS est concerné et la nouvelle conception n'affectera rien à un niveau supérieur du système.
Reconception - complexe / remplacement du système	Une reconception majeure de l'assemblage affecte les assemblages au-delà de l'ASS de l'élément obsolète et peut nécessiter la modification d'assemblages, de logiciels et d'interfaces de niveau supérieur.

visant à garantir la disponibilité de l'approvisionnement existant. Les résolutions de substitution (ingénierie) requièrent une implication de l'ingénierie pour être qualifiées ou mises en œuvre. Les résolutions de refonte nécessitent généralement tous les aspects de l'ingénierie et de la qualification pour mettre en œuvre un équipement nouveau ou fortement modifié.

Le choix d'un type de remédiation dépend fortement de son efficacité sur le système et du fait que sa mise en œuvre crée ou non des modifications fonctionnelles ou physiques.

Une modélisation du système et une définition de ses dépendances architecturales est alors nécessaire. Le domaine de l'ingénierie des systèmes offre la possibilité de vérifier un ensemble de solutions sur le système tout en respectant les contraintes de conception.

2.3 Ingénierie des systèmes (IS)

Étant donné la complexité croissante des systèmes, l'ingénierie des systèmes, noté l'IS, a été mise en place pour résoudre les problèmes liés à leur conception (Walden u. a., 2015). L'IEEE¹ définit l'IS comme "une approche interdisciplinaire et collaborative pour dériver, faire évoluer et vérifier une solution à un système, tout au long du cycle de vie pour répondre aux attentes des clients et obtenir l'acceptation du public (Tien und Berg, 2003)". Selon l'EIA-ISO 632, "l'ingénierie des systèmes est une approche interdisciplinaire qui englobe tous les efforts techniques visant à développer et à vérifier un ensemble de solutions pour les systèmes, les utilisateurs et les processus dans un cycle de vie total et intégré afin de répondre aux besoins des clients."

L'ingénierie des systèmes adopte l'approche de l'ingénierie des systèmes basée sur les modèles (MBSE) pour gérer plus efficacement les systèmes complexes. La mise en œuvre de ces modèles présente plusieurs avantages. Leur utilisation, tout au long du cycle de vie du produit, augmente la cohérence dans toutes les phases de conception ; elle facilite la communication entre les équipes de développement de produits et également avec les parties prenantes. Enfin, elle garantit la flexibilité dans l'intégrité des spécifications et la conception des systèmes (Bourque u. a., 2014).

Dans le MBSE, les modèles représentent les caractéristiques opérationnelles, comportementales, fonctionnelles et structurelles du système. Un processus d'ingénierie de système doit fournir une solution robuste et évolutive qui respecte les contraintes de conception, de budget et de délais. Il fournit une approche basée sur des processus génériques et un ensemble de concepts (fonction, scénario, élément de système, exigence, etc.) et décrit ce qu'il faut faire et il est composé d'un ensemble d'activités et de tâches organisées autour d'un objectif.

2.3.1 Les outils et les méthodologies de l'ingénierie système

Pour décrire le comment faire, on utilise des techniques et des méthodes de modélisation. Les activités et les tâches de l'IS sont des transformations de données génériques appelées entités. Chaque entité est caractérisée par des attributs spécifiques qui peuvent avoir des valeurs différentes. Pour suivre une séquence logique d'opérations, il faut expliciter les relations entre les entités. L'ontologie de l'IS est un ensemble d'entités et de leurs relations. Cette ontologie offre de nombreux avantages : (1) un vocabulaire standardisé utilisé dans différentes méthodes et techniques de modélisation (2) et l'identification des impacts des modifications

1. Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens

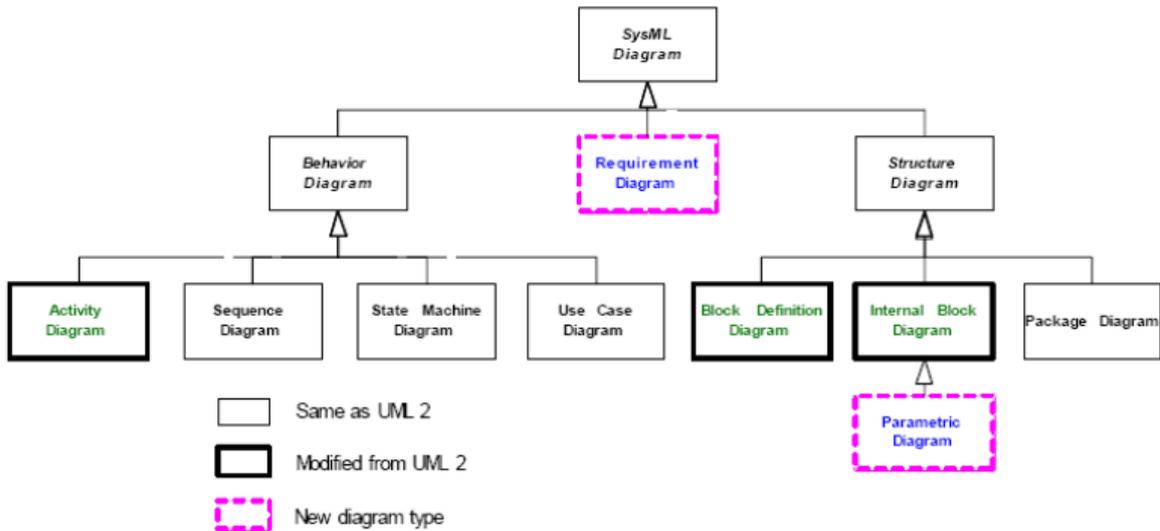


FIGURE 2.4 – Types de diagrammes SysML (Hause u. a., 2006)

dans les entités d'ingénierie système (Sebok2020guide, 2020).

TABLE 2.5 – Outils, méthodes et langages de l'ingénierie des systèmes

Les outils de l'IS	Détails de développement à	Description	Limites
APTE	APTE L'Application to business Techniques (APTE) a été fondée par Gilbert Barbey en 1964 (Zehtaban und Roller, 2012).	L'APTE se concentre sur l'analyse fonctionnelle dès les premières étapes de la conception. Après l'analyse des besoins du client, le diagramme Octopus est utilisé pour déterminer les exigences fonctionnelles. Les liens entre le produit et l'environnement extérieur (contraintes et exigences fonctionnelles) sont déterminés (Costadoat u. a., 2011).	L'APTE ne détermine pas comment chaque élément et sa fonctionnalité doivent être mis en œuvre. Cette méthode ne donne qu'un aperçu général du produit et de sa relation avec l'environnement (Zehtaban und Roller, 2012).
QFD	Le QFD (Quality Functional Deployment) a été développé par Yoji Akao au début de 1966 au Japon.	La méthode a été créée pour inclure les besoins des clients dans le processus de conception et est utilisée pour le développement de produits, la gestion de la qualité et l'analyse des besoins des clients (Kamarudin, 2017). Le processus QFD comprend quatre phases basées sur quatre matrices pour transférer les besoins des clients depuis les étapes initiales de planification jusqu'au le contrôle de la production.	Le QFD permet d'offrir des compromis entre les capacités de l'entreprise et les exigences du client (Chien und Su, 2003). Les facteurs sociaux, économiques et politiques ne sont pas explicites, c'est-à-dire qu'elle ne donne pas les interactions système-environnement (Bartolomei, 2007). Pour les projets complexes, il est très difficile de gérer de grandes matrices (Lowe und Ridgway, 2000).

IDEFO	Il est développé par l'ICAM en 1981.	L'IDEFO est "une technique de modélisation commune pour l'analyse, le développement, la réingénierie et l'intégration des systèmes d'information, des processus commerciaux ou de l'analyse du génie logiciel" (Lowe und Ridgway, 2000). Il contient des techniques et des règles pour la standardisation d'une représentation graphique d'un système.	Il ne décompose que la fonction principale, et non les contraintes. En outre, les flux et les paramètres ainsi que la configuration sont limités par cette méthode (Zehtaban und Roller, 2012).
UML	Son développement a commencé en 1994 par Booch et Rumbaugh.	L'UML est un langage de modélisation qui définit un système à travers de multiples vues : dynamique, statique, interaction homme-machine et physique (Rochet, 2007).	Les éléments du langage ne sont pas basés sur des concepts mathématiques (forme de Backus-Naur), ce qui rend impossible la vérification mathématique de la cohérence sémantique d'un diagramme UML. UML n'est pas associé directement à une méthode, c'est juste un langage. Le processus qui met en œuvre la boîte à outils UML n'est pas défini (Turki, 2008).
SysML	La définition du SysML a commencé en janvier 2001 par le Conseil international pour l'ingénierie des systèmes (INCOSE).	SysML est une extension du langage UML et devrait répondre au besoin d'un langage pour les activités d'ingénierie des systèmes et pour faciliter la communication entre des parties hétérogènes (Turki, 2008). SysML permet la conception, l'analyse, la spécification, la vérification et la validation des systèmes (OMG, 2006).	SysML adapté à l'ingénierie des systèmes, il est plus facile à apprendre car il est plus simple. Cependant, les liens entre les diagrammes ne suivent aucune logique précise, il y a donc un chevauchement sémantique entre eux (Rochet, 2007). L'approche de la modélisation n'est pas assez claire. Cela est dû au fait que UML et SysML ne sont que des langages de modélisation visuelle et non un cadre de modélisation et qu'ils n'appartiennent à aucune méthodologie de système (Estefan u. a., 2007).

Pour garantir que les modèles sont adaptables aux différents aspects du système et peuvent être utilisés par toutes les disciplines tout au long de son cycle de vie, le MBSE fournit plusieurs langages, outils et cadres de modélisation de système, voir le Tableau. 2.5. Les langages de modélisation des systèmes complexes sont généralement basés sur la modélisation orientée objet. Un de ces langages est UML (Unified Modeling Language) développé par l'OMG (Object Management Group) à partir des concepts introduits par Booch u. a. (2000). L'UML ne tient pas compte de la spécificité du développement des systèmes. Cela a conduit au développement d'un autre ensemble d'outils pour l'analyse et la conception de systèmes appelé SysML (Specification, 2007). Le langage SysML contient 9 diagrammes (ils sont identifiés dans la Figure. 2.4) : le diagramme d'activités, le diagramme de séquence, le diagramme de machines d'état, le diagramme des cas d'utilisation, le diagramme des exigences, le diagramme de définition des blocs, le diagramme de bloc interne, le diagramme de paquetage et le diagramme paramétrique. Ces diagrammes peuvent être classés suivant leur type : les diagrammes comportementaux, le diagramme d'exigence et les diagrammes de structure. Ils permettent une modélisation multi-vue avec différentes représentations du système reliées entre elles, pour assurer la traçabilité des éléments de modélisation entre eux.

L'utilisation efficace de ces outils nécessite des méthodologies pour guider les développeurs à travers les différentes phases. Une description des méthodologies MBSE est fournie dans le Tableau. 2.6.

TABLE 2.6 – Une description des méthodologies de MBSE

Méthodologies	Description	Logiciel
INCOSE-Méthode d'ingénierie des systèmes orientés objet (OOSEM)	L'OOSEM est développé à partir de travaux réalisés dans les années 1990 au sein du Software Productivity Consortium (aujourd'hui le Systems and Software Consortium) en collaboration avec la Lockheed Martin Corporation (Estefan u. a., 2007). Il fournit un cadre intégré (Karban u. a., 2016) qui inclut des techniques orientées objet, des pratiques traditionnelles d'ingénierie des systèmes et une méthodologie de conception basée sur des modèles. L'OOSEM comprend six activités : l'analyse des besoins des parties prenantes, la définition des exigences du système, la définition de l'architecture logique, la synthèse des architectures candidates assignées, l'évaluation et l'optimisation des alternatives, et la validation et la vérification du système.	Il n'existe pas d'un logiciel spécifique pour le cadre de travail de l'OOSEM (Estefan u. a., 2007).
IBM Telelogic Harmony-SE	Estefan (2009) montre que "cette méthodologie est une approche axée sur la demande de service", représentée par des diagrammes SysML et des changements d'état/mode. C'est une sorte de reflet du modèle Vee. Selon Estefan u. a. (2007), Harmony-SE a les objectifs clés suivants : identification des fonctionnalités requises du système, identification des états et des modèles de système associés et affectation des fonctionnalités système à l'architecture physique.	IBM Telelogic ne fournit aucun logiciel pour le système Harmony-SE (Estefan u. a., 2007).
IBM Rational Unified Process for Systems Engineering (RUP SE)	Le Rational Unified Process for Systems Engineering (RUP SE) est dérivé du Rational Unified Process® (RUP®). RUP est une méthodologie qui est un produit de processus d'IBM Rational ainsi qu'un cadre de processus. Le cycle de vie de RUP est basé sur un modèle en spirale (Estefan u. a., 2007). Pour gérer le développement de logiciels, le RUP a été largement utilisé dans l'industrie et le gouvernement (Kruchten, 2004). Pour répondre aux exigences des projets d'ingénierie système, RUP SE a été créé (Cantor, 2001; Cantor und Plug, 2003). Le processus comporte quatre étapes : création, développement, construction, transition. Et pour chaque phase, il y a deux types d'activités : Les disciplines d'ingénierie (modélisation commerciale, exigences, test, déploiement et mise en œuvre) et les disciplines de soutien (gestion du changement et configuration et gestion de projet et environnement) (Estefan u. a., 2007).	Le logiciel Rational® d'IBM supporte cette méthodologie grâce au plugin RUP SE pour le Rational Method Composer (RMC) (Estefan u. a., 2007).
Vitech MBSE	La méthodologie Vitech MBSE a été développée à l'origine par Jim Long, un membre d'INCOSE (Estefan, 2009). Ce cadre est basé sur quatre domaines : les exigences de la source, le comportement (modèles de comportement du système, entrées/sorties), l'architecture (composants, architecture du système et interfaces), la validation et la vérification (Mazeika u. a., 2016).	Il n'existe pas de logiciel soutenant la méthodologie Vitech MBSE (Estefan u. a., 2007).
Méthodologie objet-processus (OPM)	Méthodologie objet-processus développée en 2002 par Dori (2002). Elle vise à exprimer la structure, le comportement et la fonction des systèmes dans un modèle unique en combinant des diagrammes visuels formels objet-processus (OPD) avec un langage de processus appelé "Langage objet-processus" (OPL) (Dori, 2002). Les principales tâches de l'OPL sont la spécification des exigences, l'analyse et la conception, la mise en œuvre, l'utilisation et la maintenance (Ramos u. a., 2011).	L'OPM dispose d'un outil de soutien "OPACT" (Estefan u. a., 2007). La dernière version de ce logiciel au moment de la rédaction du présent document est OPCAT V4.0.

<p>PL State Analysis (SA)</p>	<p>Cette méthodologie est développée au Jet Propulsion Laboratory de la NASA. PL State Analysis est une méthodologie MBSE qui intègre à la fois des architectures basées sur des modèles et des architectures basées sur des états (Estefan, 2009). Wagner u. a. (2012) considèrent que la méthode d'analyse d'état vise à fournir une architecture de système de contrôle, plutôt qu'une architecture fonctionnelle ou physique, en représentant et en documentant les états du système, en modélisant le comportement des variables d'état et leurs interactions et en introduisant les objectifs de la mission dans des scénarios détaillés (Wagner u. a., 2012).</p>	<p>La base de données d'état constitue un logiciel de soutien à la SA (Bennett u. a., 2005) en s'appuyant sur un système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) conforme au langage SQL (Structured Query Language), comme Oracle®.</p>
<p>Processus de modélisation des systèmes Weilkiens (SYSMOD)</p>	<p>SYSMOD (Systems Modeling Toolbox) est une méthodologie générale de modélisation des exigences et des architectures des systèmes (Weilkiens, 2015), selon Weilkiens u. a. (2016). Le processus de cette méthodologie est basé sur l'activité suivante : identifier les parties prenantes, collecter les exigences, modéliser le contexte du système, analyser les exigences à l'aide de cas d'utilisation, définir un modèle de domaine et définir l'architecture fonctionnelle, physique et logique du système (Mazeika u. a., 2016).</p>	<p>Le plugin SysML MagicDraw fournit des icônes SYSMOD, des stéréotypes de diagrammes et des icônes.</p>
<p>Méthodologie de développement dirigée par les modèles (MDDM)</p>	<p>Le MDDM est une méthodologie du MBSE. Elle est basée sur "un modèle central de qualité maximale" (Di Maio, 2014) applicable à toutes les équipes de projet. Pour modéliser l'architecture, elle s'appuie sur quatre étapes : exigences (RQ), analyse fonctionnelle (FA), conception logique (LOD) et intégration physique (PI) (Weilkiens u. a., 2016).</p>	<p>Il n'existe pas de logiciel soutenant la méthodologie MDDM.</p>
<p>Fernandez ISE & Process Pipelines in OO Architectures (ISE&PPOOA)</p>	<p>ISE&PPOOA (Integrated Systems Engineering and Pipelines of Processes in Object-Oriented Architectures) est l'une des méthodes d'ingénierie pour les produits complexes. Son objectif est d'évaluer l'efficacité énergétique des systèmes industriels (Fernandez u. a., 2016). Dans les travaux de Hernandez und Fernandez-Sanchez (2017), on trouve l'application de cette méthode dans un système robotisé. Elle comporte six étapes : 1- identifier le contexte et les limites du système, 2- modéliser l'architecture fonctionnelle du système, en fonction de l'architecture du système, 3- identifier les principaux flux de matière et d'énergie entre les blocs du système identifiable, 4- détailler les équations et les corrélations qui déterminent le flux de matière et d'énergie, 5- déterminer les degrés de liberté du système et évaluer la résolution possible et 6- résoudre les corrélations et les équations avec les outils informatiques nécessaires.</p>	<p>Un add-on gratuit pour Microsoft Visio 2003 est considéré comme le logiciel de support du PPOOA.</p>
<p>ARCADIA (ARChitecture Analysis and Design Integrated Approach)</p>	<p>Thales a créé la méthode ARCADIA en 2007. Elle effectue une analyse fonctionnelle et l'association de fonctions avec les composants de l'architecture tout en définissant implicitement un langage de modélisation (Huang und Mak, 1999; ISO/IEC, 2008). Par ses différentes étapes/niveaux, il fournit une feuille de route permettant de comprendre les besoins des clients et, en fin de compte, de construire l'architecture logique et physique d'un système. Elle permet de garantir l'intégrité, la validation et la vérification de la solution fournie.</p>	<p>Capella est la plateforme open source qui soutient la méthodologie. Il contient un atelier de modélisation graphique (Huang und Mak, 1999). ARCADIA utilise, avec Capella, le langage de modélisation des systèmes, largement inspiré d'UML et SysML.</p>

2.3.2 Le choix d'ARCADIA

ARCADIA est basé sur 5 niveaux commençant par la modélisation externe en définissant les acteurs externes et se terminant par les spécifications physiques du système, voir le Tableau. 2.7. Pour chaque niveau, Capella propose un certain nombre de diagrammes. Bien qu'ARCADIA soit une méthodologie de modélisation structurée, elle reste flexible. On peut créer des diagrammes dans un ordre "quelconque" et arrêter la modélisation à tout moment en fonction du niveau de compréhension attendu. Le Tableau. 2.7 donne un aperçu des niveaux et des diagrammes Capella les plus importants. L'importance des modèles Capella est de connaître toutes les dépendances entre les différents niveaux et éléments du système. Cette grande base de données est utilisée pour étudier l'efficacité d'une remédiation pour gérer l'obsolescence. La meilleure façon de représenter ces informations est à travers des matrices de dépendances.

TABLE 2.7 – Les niveaux d'ARCADIA

Niveaux d'ARCADIA	Rôle et notations	Diagrammes de Capella
Analyse opérationnelle	La première étape décrit les futurs utilisateurs du système appelés dans le vocabulaire d'ARCADIA entités opérationnelles. S'ils sont des humains, nous parlons ici d'acteurs opérationnels. Elle détermine également leurs besoins, attentes et objectifs. Ce niveau décrit ce que le futur système doit offrir à ses utilisateurs. Nous parlons donc de capacité opérationnelle.	<ul style="list-style-type: none"> - OCB (Diagramme de Capacités Opérationnelles) : ce diagramme permet de définir les capacités, les entités et les acteurs opérationnels. Il détermine les relations entre eux. - OAIB (Diagramme d'Interaction des activités opérationnelles) : pour chaque capacité opérationnelle, nous définissons une série de fonctions. Ces sont les fonctions des utilisateurs du système. - OAB (Diagramme d'architecture opérationnelle) : nous avons les entités et leurs fonctions. Donc, à travers ce diagramme nous les associons ensemble (qui fait quoi). L'OAB définit l'architecture opérationnelle du système. C'est l'architecture du plus haut niveau de description.
Analyse du système	La deuxième étape se concentre sur le système lui-même. Nous essayons de savoir comment le système fonctionne pour répondre aux besoins des utilisateurs. Nous parlons ici des fonctions du système. Parmi les concepts de ce niveau, on peut noter la chaîne fonctionnelle. Une chaîne fonctionnelle permet de relier toutes les fonctions inter-reliées pour répondre à un besoin exprimé au niveau opérationnel. Elle contextualise donc les dépendances entre les fonctions.	<ul style="list-style-type: none"> - SDFB (Diagramme de flux de données du système) : à travers ce diagramme, nous ajoutons les fonctions du système, mais aussi nous précisons les échanges entre les fonctions en définissant les données circulant entre elles via leurs ports d'entrée/sorties. - SAB (diagramme d'architecture Système) : ce diagramme permet de définir une entité qui prend le nom du système et qui alloue les fonctions ajoutées dans SDFB. En outre, les liens entre le système et les utilisateurs définis dans le premier niveau sont définis.

Architecture logique	<p>Cette étape vise à diviser le système en sous-systèmes (appelés composants logiques). Chaque partie contient un ensemble de fonctions du système déterminées au niveau précédent. Les relations entre les différentes parties du système sont déterminées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - LAB (diagramme d'architecture logique) : on détermine les composants du système et leurs propriétés.
Architecture physique	<p>Dans cette étape, nous continuons le développement du système en déterminant sa construction et son architecture finale. Ici, les composants physiques sont ajoutés. Il existe deux types de composants. Le premier type est un composant physique de comportement qui exécute un certain nombre de fonctions système. Le deuxième type est un composant physique de nœud (que nous appellerons " hébergeur ") qui héberge un certain nombre de composants physiques comportementaux.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - PDFB (Diagramme de flux de données physiques) : ce diagramme permet d'ajouter d'autres fonctions et sous-fonctions. Ces fonctions sont proches de l'exécution par des composants. Ce sont des fonctions nécessaires à l'exécution des fonctions identifiées au niveau logique. - PAB (Diagramme d'Architecture Physique) : nous définissons les composants physiques et les associons à des fonctions. Les échanges entre ces composants et les liens physiques entre les composants physiques hébergeurs (du nœud) sont déterminés. Les échanges sont ainsi effectués via des liens bidirectionnels.
EPBS (End Product Breakdown Structure)	<p>Dans ce dernier niveau, nous regroupons les composants physiques dans des éléments de configuration. Un élément de configuration rassemble des composants physiques. Les composants physiques sont souvent regroupés en éléments de configuration plus gros et plus pratiques à gérer, en termes d'organisation industrielle et de responsabilités. Cette détermination permet de spécifier ce qui est attendu du fournisseur de chaque composant. Ces éléments de configurations doivent répondre aux choix et aux contraintes de conception (logiciels ou matériels fabriqués ou achetés sur étagère).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - CIBD (éléments de configuration dans un diagramme de répartition) : dans ce diagramme, nous définissons une arborescence qui commence par le système décomposé en sous-systèmes. Un choix est fait sur la catégorie de chaque sous-ensemble. Il s'agit d'un choix important qui définit les composants qui doivent être développés en interne de l'entreprise (Make), ceux qui sont achetés sur étagère (Buy) et enfin ceux qui seront définis par les fournisseurs (Make to Make).

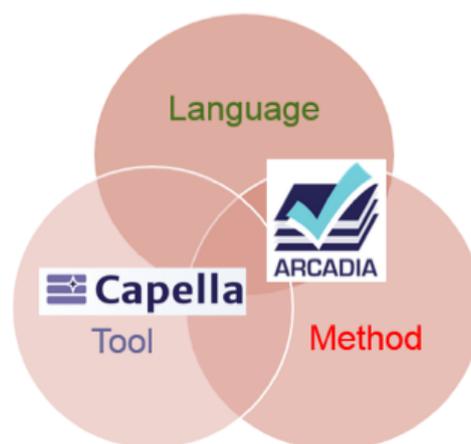


FIGURE 2.5 – Les trois piliers de MBSE avec ARCADIA / Capella (Roques, 2016).

La Figure. 2.6 présente la vue d'ensemble – simplifiée – des principales vues, perspectives et liens guidant l'ingénierie et la modélisation ; vue fonctionnelle (activités, en orange, et fonctions, en vert), vue structurelle comportementale (composants comportementaux, en bleu),

TABLE 2.8 – Les avantages d'ARCADIA et de Capella

Avantages	Description
Bonne gestion de l'analyse fonctionnelle	L'analyse fonctionnelle spécifie les activités du système pour répondre aux exigences (Sage und Rouse, 1999). Dans Capella, les fonctions sont caractérisées par des flux d'entrée et de sortie et par des ports spécifiques. Ces ports permettent d'attribuer des fonctions hors niveau. Les fonctions parents contiennent artificiellement les ports des fonctions enfants (Bonnet u. a., 2016).
Bien adapté	ARCADIA est bien adapté à différents types d'approches d'analyse fonctionnelle et à leur combinaison : top-down, bottom-up, basées sur des chaînes fonctionnelles et pilotées par des besoins opérationnels ou des approches de cas d'utilisation (Voirin u. a., 2016).
Enrichissement et simplicité	ARCADIA couvre une partie des cadres d'architecture non couverts par SysML. Capella permet la réutilisation pour faciliter la conception de l'architecture.
Clarté	Capella fournit une vue qui contient les niveaux ARCADIA et leur liste associée de diagrammes (potentiels) à mettre en place.
Un cadre et non un langage de conception	SysML et UML sont des langages, et non des méthodologies structurées. Capella comble cette lacune (Calio u. a., 2016).

vue structurelle d'implémentation (composants physiques hôtes, rectangles jaunes), représentation des éléments échangés (data, ronds gris) et points de vue d'analyses et de spécialités (viewpoints, en gris), (Voirin, 2017).

En se référant aux trois piliers, cf. la Figure. 2.5, bien connus de MBSE, ARCADIA fournit un langage de modélisation et une approche de modélisation ; Capella est un logiciel qui intègre à la fois le langage et la méthode (Roques, 2016). Le Tableau. 2.8 présente un ensemble de caractéristiques d'ARCADIA qui justifient notre choix de l'utiliser dans la modélisation d'un système complexe dans la suite de ce travail.

2.4 Les matrices de dépendances : DSM et DMM

Les modèles ARCADIA contiennent différents types de dépendances au sein de l'architecture du système. Nous adoptons la définition de la dépendance fournie par Essabbar u. a. (2014) : "B dépend de A, écrit $A \rightarrow B$, indique que si un changement se produit sur une ou plusieurs caractéristiques de A, alors au moins une des caractéristiques de B serait modifiée". Supposons qu'A soit un microprocesseur et que B soit une carte mémoire. Comme A envoie des données à B, toute modification des caractéristiques de A peut avoir un impact sur les caractéristiques de B. Cela pourrait être le cas du décalage de fréquence. La modification de la fréquence des microprocesseurs peut avoir un impact sur la mémoire si et seulement si cette dernière est incapable de traiter la nouvelle valeur ; c'est-à-dire que la nouvelle fréquence du

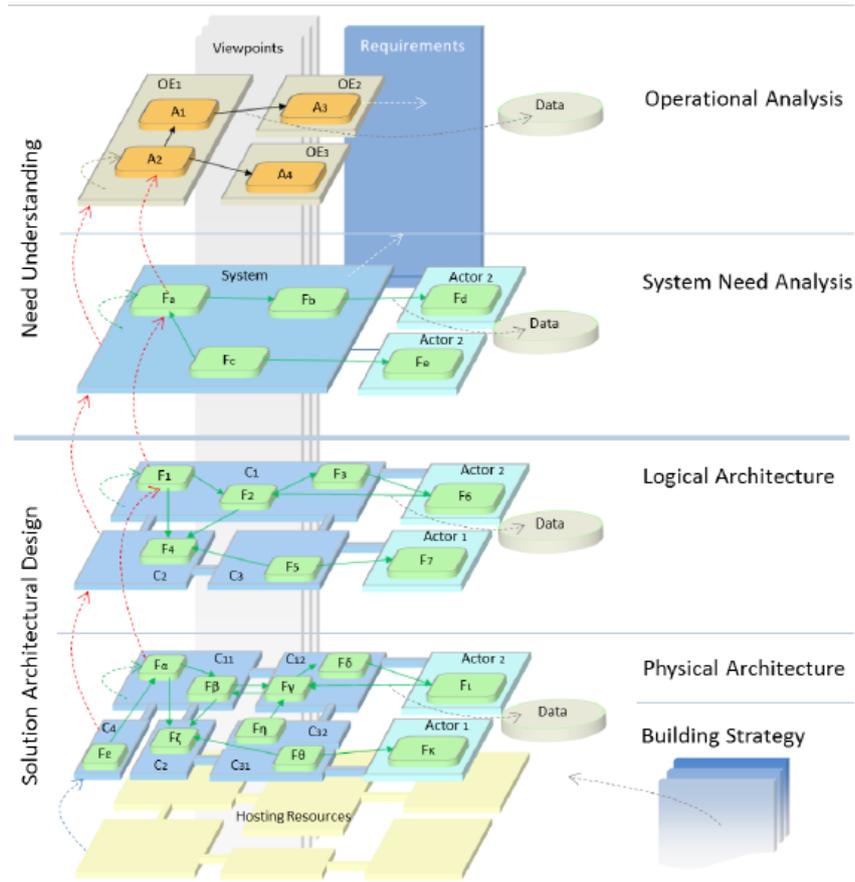


FIGURE 2.6 – Les vues et les perspectives structurant la démarche ARCADIA, (Voirin, 2017).

microprocesseur est hors tolérance de la mémoire.

Par conséquent, la propagation du changement d'une entité à une autre peut être qualifiée par une valeur réelle représentant la probabilité de propagation du changement. Formellement, notons le changement de A par $\rightsquigarrow A$. Ainsi, la possibilité de changement de B sachant (i) la modification de A (c'est-à-dire $\rightsquigarrow A$) (ii) et leur dépendance pourrait être représentée avec la probabilité conditionnelle de ce qui suit :

$$P(\rightsquigarrow B \mid [(A \rightarrow B) \wedge \rightsquigarrow A]) \quad (2.1)$$

Les modèles ARCADIA cartographient les dépendances fonction-fonction et composant-composant. Cela permet de penser ces dépendances comme un graphique dirigé obtenu en joignant tous les $A \rightarrow B, \forall A, B \in \text{Système}$. Les dépendances fonction-fonction, notées FF , définissent la manière dont la combinaison des fonctions nous permet de réaliser les différentes fonctionnalités dont les utilisateurs ont besoin. Les dépendances entre composants, notées CC , définissent la manière dont l'énergie, le mouvement et les données doivent être échangés entre les composants pour réaliser les fonctions. Enfin, l'architecture du système définit quels composants exécutent quelles fonctions. Les dépendances du système sont ensuite représentées dans un graphe biparti dirigé où les nœuds représentent des entités (composants ou fonctions). Le modèle de dépendance ou les bords du graphe ont alors la sémantique suivante :

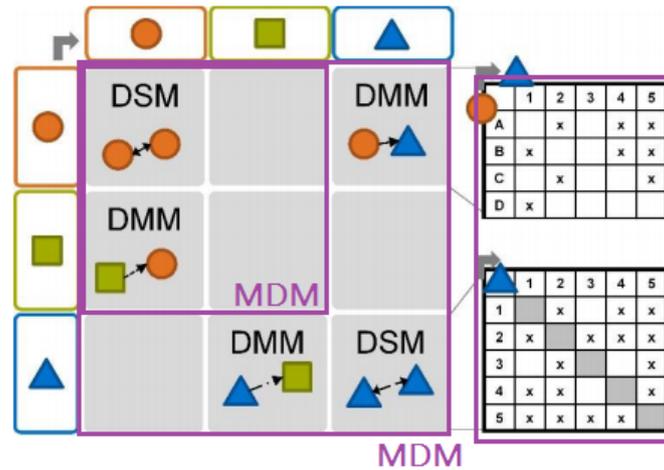


FIGURE 2.7 – Multiple Domain Matrix (MDM), Domain Mapping Matrix (DMM) et Design Structure Matrix (DSM), adapté de (Marija u. a., 2017)

- Arc : $C \rightarrow C$. Il fait référence aux échanges entre les composants (énergie, mouvement ou données).
- Arc : $F \rightarrow F$ arc. Il représente le lien logique entre deux fonctions.
- Arc : $F \leftrightarrow C$. Il définit l'affectation des fonctions aux composants.

Par conséquent, l'étude de la propagation d'un changement d'entité, $\rightsquigarrow A$, consiste à étudier les probabilités conditionnelles de changement de tout nœud C , c'est-à-dire $\rightsquigarrow C$, lié directement ou indirectement par divers chemins possibles à A . Techniquement, la transformation des modèles ARCADIA en un graphe probabiliste passe par des matrices intermédiaires. La première matrice est utilisée pour représenter les relations entre les mêmes entités (fonctions ou composants). Elle est appelée DSM (Design Structure Matrix) (Steward, 1981) qui est une matrice carrée, voir la Figure. 2.7. L'élément (i, j) de la matrice montre s'il y a ou non une dépendance entre l'élément de la ligne i et l'élément de la colonne j . Elle représente les dépendances entre les éléments d'un même domaine à l'aide d'une matrice carrée. Pour modéliser la correspondance entre les fonctions et les éléments, on utilise les Domain Mapping Matrices, DMMs en abrégé. Il s'agit d'une matrice rectangulaire qui contient les entrées de deux DSM (Danilovic und Browning, 2007) et permet de cartographier entre deux domaines différents. Le mélange de ces deux matrices est un Multiple Domain Matrix (MDM), proposée par Gorbea u. a. (2008), comme le montre la Figure. 2.7. Le graphique de la Figure 2.8 montre un réseau de nœuds (composants) inter-connectés et la représentation DSM. Des méthodes reposant sur des matrices DSM et DMM ont été proposées pour concevoir conjointement les architectures fonctionnelles et physiques d'un système ou pour propager des changements entre l'architecture du système et l'architecture de l'organisation de conception [(Bonjour u. a., 2010), (Bonjour u. a., 2013)].

Pour étudier la propagation et l'effet de l'obsolescence, ces matrices sont utilisées pour construire des graphes probabilistes. Parmi ces graphes, nous nous intéressons aux réseaux

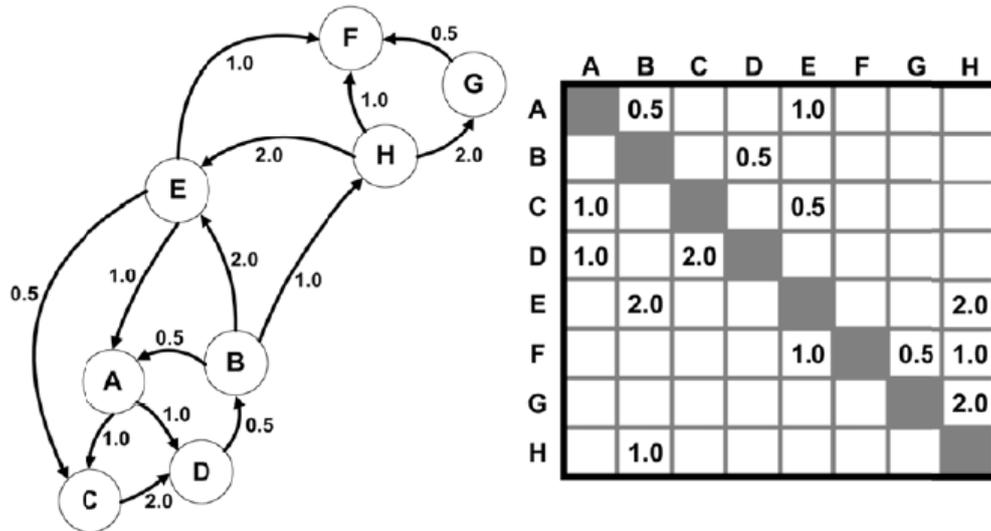


FIGURE 2.8 – Représentation DSM des composants connectés (Börjesson, 2012)

bayésiens qui sont définis dans la section suivante.

2.5 Les Réseaux Bayésiens

Un réseau bayésien (RB) est une méthode graphique probabiliste utilisée dans la modélisation causale et l'inférence probabiliste. Il est basé sur un graphique acyclique dirigé (DAG) qui représente les relations d'indépendance conditionnelle entre des variables aléatoires (Clarkson u. a., 2004). Les réseaux bayésiens font partie de la famille des modèles graphiques probabilistes utilisés pour représenter les connaissances sur un domaine incertain. Ces modèles sont développés pour enrichir le raisonnement des systèmes dont le fonctionnement est basé sur un ensemble de règles incertaines. Un RB est une structure particulière entre les données : "Un RB est une technique de codage d'un ensemble de propositions d'indépendance conditionnelle" (Russel, 2010). Ces structures graphiques sont basées sur la théorie des probabilités, la théorie des graphes, l'informatique et les statistiques (Jensen, 1996). Un RB est caractérisé par deux propriétés : (i) propriété qualitative : le graphe est orienté et acyclique, (ii) propriété quantitative : les probabilités des paramètres représentés par les nœuds sont orientées de manière à respecter la condition markovienne selon laquelle la distribution de probabilité conditionnelle de chaque paramètre ne dépend que de ses parents.

Un nœud du RB représente une variable aléatoire qui peut être continue (par exemple la tension d'alimentation d'un moteur à courant continu) ou discrète (par exemple [obsolète et non obsolète] ou [en fonctionnement, en panne, en mode dégradé]). Dans ce qui suit, nous traitons des variables aléatoires discrètes, ce qui signifie que même une variable aléatoire continue est transformée en une variable discrète en considérant divers intervalles. Par exemple, la tension d'alimentation (qui est continue et peut être définie par une distribution normale) est considérée comme ayant deux niveaux correspondant à Faible [2.3v, 4v] et Élevé [4v, 6v].

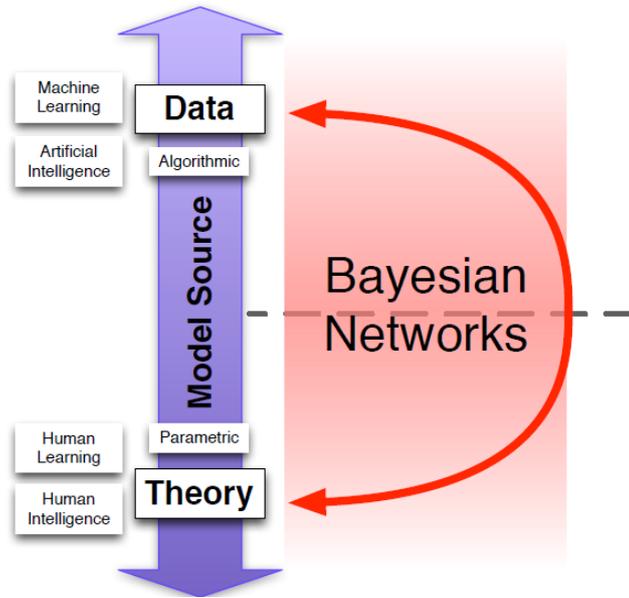


FIGURE 2.9 – Les réseaux bayésiens englobent la théorie et les données, (Conrady und Jouffe, 2013)

La sémantique sous-jacente à un RB est la dépendance. L'existence d'un arc orienté de X à Z signifie que l'état de Z dépend de l'état de X . Dans cette construction, la variable/nœud X est le "parent" et la variable/nœud Z est l'"enfant".

Les RBs représentent un outil pertinent pour la prise de décision avec des connaissances incertaines (Langseth und Portinale, 2007) et contrairement à d'autres méthodes telles que les réseaux de Petri ou l'arbre de défaillance, ils sont capables de calculer avec précision l'influence des composants ou des éléments dépendants (El Hassene u. a., 2014a). Les réseaux bayésiens sont utilisés, par exemple, pour estimer la disponibilité et la fiabilité de systèmes complexes (Langseth und Portinale, 2007) sur la base de données statistiques et de jugements d'experts. La construction des réseaux bayésiens est basée sur 5 étapes (Langseth und Portinale, 2007; El Hassene u. a., 2014a) : spécifier ce que l'on veut modéliser, définition des variables, étape qualitative, étape quantitative et vérification.

Ce graphique représente une distribution de probabilités sur un espace combinatoire de manière compacte (Fargier u. a., 2018). Dans le graphe, chaque nœud représente une variable aléatoire et les arcs entre les nœuds représentent les dépendances probabilistes entre les variables (Ben-Gal, 2008). Les RBs fournissent, sur un ensemble de variables aléatoires, une représentation et un calcul parfaits de la distribution de probabilité conjointe (Pearl, 1988). Mrad u. a. (2015) définissent le RB comme "un couple (G, P) , où $G = (X, E)$ est un graphe acyclique dirigé avec les nœuds $X = X_1, \dots, X_n$ et les arcs dirigés E qui représentent les dépendances conditionnelles entre les nœuds. La distribution de probabilité conjointe pour $X = X_1, \dots, X_n$ est donnée par la règle de Bayes :"

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i)) \quad (2.2)$$

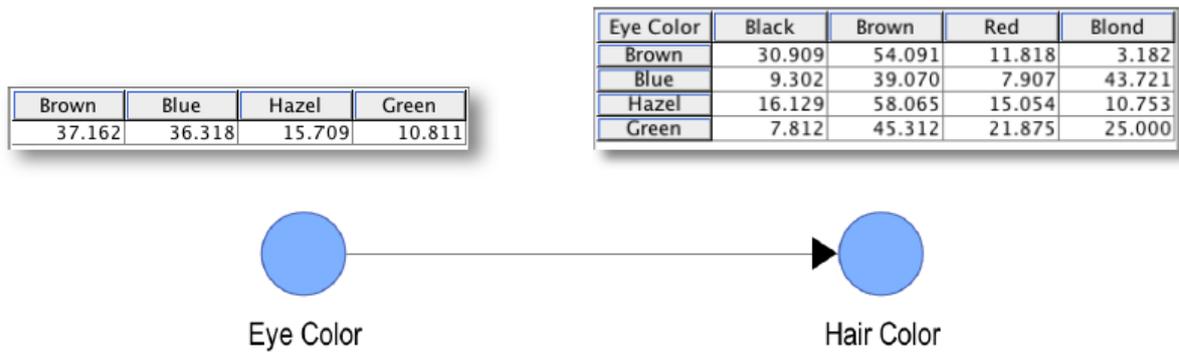


FIGURE 2.10 – Un réseau bayésien représentant la relation statistique entre deux variables, (Conrady und Jouffe, 2013)

où $Pa(X_i)$ est l'ensemble des parents de X_i dans le graphique G .

La formule de Bayes 2.2 ne fait aucune hypothèse sur la causalité entre le parent et l'enfant. Les relations entre un nœud enfant et tous ses parents sont définies par une table de probabilité conditionnelle (TPC). Si un nœud n'a pas de parents, il peut être décrit par une distribution de probabilité marginale. Pour chaque variable, la taille du TPC est le produit du nombre d'états du nœud enfant et de tous ses nœuds parents (Pollino und Henderson, 2010). Si les liens ou les arcs entre les paramètres (enfants et parents) sont causaux, le réseau bayésien est causal. La relation causale de X à Z présuppose que la cause X est temporellement antérieure à l'effet Z , selon le principe fondamental de causalité en physique. Par exemple, il représente le lien entre une cause (Vol) et son effet (Alarme). Toutefois, les liens peuvent représenter une co-occurrence ou une association de deux événements sans aucune sémantique causale ; (Alarm) et (Tremblement de terre).

De plus, grâce à leur structure graphique, les réseaux bayésiens appris par la machine sont intuitivement interprétables, ce qui facilite l'apprentissage humain et l'élaboration de théories, (Conrady und Jouffe, 2013). Comme le souligne l'arc bidirectionnel de la Figure. 2.9, les réseaux bayésiens permettent à l'apprentissage humain et à l'apprentissage machine d'interagir efficacement. De cette façon, les réseaux bayésiens peuvent être développés à partir d'une combinaison d'intelligence humaine et artificielle. Le RB est appliqué à plusieurs disciplines grâce à sa flexibilité. Parmi celles-ci figurent les domaines de l'informatique et de l'ingénierie. Les réseaux bayésiens ayant été initialement développés à partir de recherches sur l'intelligence artificielle (Varis, 1997). La médecine utilise également cet outil car il permet d'établir un diagnostic. Les réseaux bayésiens ont été utilisés et ont apporté des avantages dans d'autres domaines : évaluation des risques des centrales nucléaires, robotique, applications militaires et applications Microsoft Office (Pollino und Henderson, 2010). Par exemple, le travail de Sanchez u. a. (2020) vise à gérer des risques dans les projets par une modélisation causale basée sur les réseaux bayésiens.

La Figure. 2.10 montre un réseau bayésien très simple, composé de seulement deux nœuds

et d'un lien, représentant la distribution de probabilité conjointe des variables "Couleur des yeux" et "Couleur des cheveux" dans une population donnée. Dans ce cas, les probabilités conditionnelles de la couleur des cheveux étant donné les valeurs de son parent, la couleur des yeux, sont fournies dans un tableau. Il est important de souligner que ce réseau bayésien ne contient aucune hypothèse causale, c'est-à-dire que nous n'avons aucune connaissance de l'ordre causal entre les variables, de sorte que l'interprétation ici doit être simplement statistique (informationnelle), (Conrady und Jouffe, 2013).

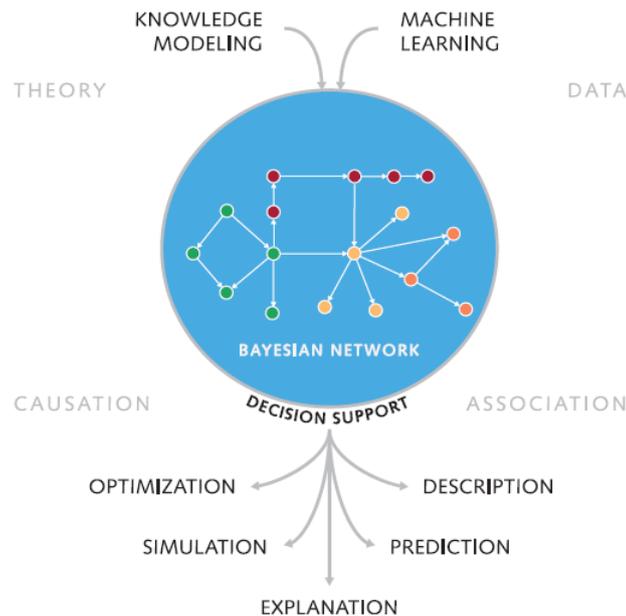


FIGURE 2.11 – Le flux de travail de BayesiaLab avec les réseaux bayésiens en son cœur, (Conrady und Jouffe, 2013)

BayesiaLab est l'un des logiciels d'assistance de RB les plus conviviaux (Conrady und Jouffe, 2015). C'est un outil puissant pour appliquer et pratiquer les réseaux bayésiens en offrant la possibilité de diagnostiquer, de simuler et de modéliser des problèmes d'optimisation. BayesiaLab est conçu autour du paradigme du réseau bayésien, comme l'illustre la Figure. 2.11. Il couvre l'ensemble du processus de recherche, de la génération du modèle à l'analyse, la simulation et l'optimisation, (Conrady und Jouffe, 2013). L'ensemble du flux de travail de recherche est entièrement contenu dans un environnement de "laboratoire" unique, qui offre aux analystes la plus grande souplesse pour passer d'un élément à l'autre de la tâche de recherche.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord décrit les différentes typologies d'obsolescence et de DMSMS et énuméré les différentes stratégies de gestion de l'obsolescence. Après avoir étudié la littérature sur l'obsolescence, il apparaît clairement qu'il n'existe aucun travail qui

se concentre principalement sur l'effet de l'obsolescence dans l'architecture et sur la manière d'en atténuer la propagation. Dans une deuxième section, nous nous intéressons au domaine de l'ingénierie des systèmes utilisés dans la conception de systèmes complexes. Les outils et méthodologies des IS sont cités et nous apportons une description détaillée de la méthodologie ARCADIA.

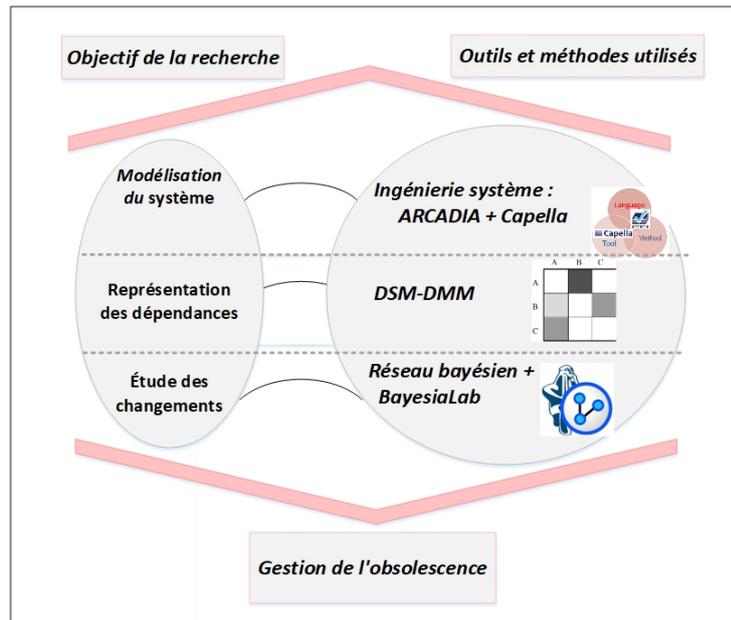


FIGURE 2.12 – les concepts et outils utilisés dans ce travail de recherche

ARCADIA fournit une feuille de route claire pour la modélisation du système à différents niveaux. Capella permet de contrôler la validité des modèles à travers des différentes étapes de modélisation. Les modèles obtenus fournissent des informations suffisantes sur le système, à un niveau de détail souhaité, pour cartographier les différents types de dépendances entre les composants et/ou les fonctions. Ces dépendances sont représentées par des matrices DSM et DMM afin de construire un seul graphique de dépendance. Il ne peut pas être utilisé pour déterminer les impacts potentiels de l'obsolescence. Ce graphe doit être transformé en des modèles utilisables par des algorithmes et des techniques de calcul. Dans notre travail, on les transforme en des réseaux bayésiens qui appartiennent à la famille des modèles graphiques probabilistes. Ces réseaux offrent la possibilité de mener diverses études quantitatives (diagnostiques et pronostiques). La Figure. 2.12 représente les techniques de base utilisées dans notre travail de recherche. Ces concepts et outils sont la base de la méthodologie proposée au chapitre 5. Mais avant de parler de la résilience d'un système à l'obsolescence et de la manière d'atténuer le risque d'obsolescence, il faut d'abord comprendre son mécanisme de propagation. Dans le chapitre suivant, nous décrivons comment l'obsolescence et le DMSMS peuvent se propager non seulement dans l'architecture mais aussi dans toute la chaîne de valeur. L'importance de l'étude de propagation est de savoir où mettre des barrières qui limitent cette propagation et de classer les différentes sources qui déclenchent l'obsolescence.

Chapitre 3

Propagation de l'obsolescence

3.1 Introduction

L'O/DMSMS (l'obsolescence et la raréfaction) peut affecter les composants, les fonctions (internes connues par l'entreprise cible) et les fonctionnalités (externes connues par les utilisateurs et les clients). L'obsolescence est principalement liée aux fonctionnalités qu'un produit offre et, de fait, à sa conception fonctionnelle alors que le DMSMS est davantage axé sur la nomenclature de produit, de sa fabrication et de la chaîne d'approvisionnement associée. Cela pourrait conduire à définir différentes solutions en fonction de la nature de l'O/DMSMS émis. Les sources d'O/DMSMS peuvent être internes (au fabricant lui-même) ou externes (le client, le fournisseur et le reste des parties-prenantes). Chacune de ces sources peut affecter l'architecture du produit et la chaîne d'approvisionnement qui le soutient. Le DS-22 ([Office, 2016](#)) définit l'obsolescence de premier ordre et l'obsolescence dérivée. Une obsolescence de premier ordre est directement due à des forces externes, tandis qu'une obsolescence dérivée est une obsolescence souvent fonctionnelle causée par les modifications apportées pour remédier à l'obsolescence de premier ordre. Cela explique que les problèmes d'O/DMSMS se propagent sous forme de changements, de composant en composants, de composant en sous-système et de fonction en fonction au sein de son architecture. Cette propagation peut aussi toucher toute partie-prenante de l'approvisionnement et la mise à disposition des sources et des ressources permettant la fabrication du produit. Nous concluons que, du point de vue de l'entreprise qui produit, appelée ici entreprise focale (FC : Focal Company), nous avons besoin de connaître les voies potentielles de propagation de l'obsolescence pour prévoir les conséquences possibles d'un problème d'O/DMSMS et pour tout au moins les amenuiser voir les prévenir.

3.2 La propagation de changement

La résolution des problèmes d'obsolescence peut, dans de nombreux cas, entraîner des modifications de l'architecture du système. C'est notamment le cas lorsqu'un composant obsolète doit être remplacé par un autre qui ne présente pas exactement les mêmes caractéristiques. Par conséquent, la résolution des obsolescences s'accompagne très souvent de la propagation des changements et c'est pour cette raison que la gestion des obsolescences est amenée à s'appuyer sur des travaux dans le domaine de la propagation et de la gestion des changements.

Les modifications d'ingénierie sont des tâches de routine et non des exceptions dans diverses entreprises du monde entier ([Clark und Fujimoto, 1991](#)). Les changements de la conception du produit doivent tenir compte du plan de conception, de la qualité du produit, de l'équilibre des coûts de changement, des risques de mise en œuvre, etc. ([Clark und Fujimoto, 1991](#)). Cependant, la prise en compte de toute modification technique d'un produit au cours du processus de conception peut avoir des conséquences négatives, car les modifications se propagent à travers les dépendances, également appelées canaux de propagation ([Koh u. a., 2012](#)). Ainsi, les changements dans la conception d'un produit conduisent souvent à des résultats imprévi-

sibles en raison de la propagation des changements. [Jarratt u. a. \(2002\)](#); [Eckert u. a. \(2001\)](#) ont divisé la propagation des changements en une avalanche de changements, une ondulation de changements et une floraison de changements, selon l'impact des changements pendant le processus de propagation des changements.

[Huang und Mak \(1999\)](#) définissent l'ingénierie de changement comme "les changements et les modifications des formes, des ajustements, des matériaux, des dimensions, des fonctions, etc. d'un produit ou d'un composant". [Jarratt u. a. \(2003\)](#) proposent une définition plus générale : "l'ingénierie de changement est une modification apportée à des pièces, des dessins ou des logiciels qui ont déjà été publiés pendant le processus de conception du produit. Le changement peut être de n'importe quelle taille ou de n'importe quel type; le changement peut impliquer n'importe quel nombre de personnes et prendre n'importe quelle durée." L'objectif de la gestion du changement est non seulement de réduire le nombre de changements, mais aussi de gérer ces changements, s'ils sont effectués pour réduire les coûts, les pertes de temps et la qualité ([Ullah u. a., 2016](#)).

Afin de gérer plus efficacement la propagation du changement, [Cohen u. a. \(2000\)](#) cherchent à analyser les conséquences possibles du changement à travers la représentation pro-changement (C-FAR). Les interactions entre deux parties différentes du système sont déterminées par cette méthode dans une matrice C-FAR. [Clarkson u. a. \(2004\)](#) ont proposé une méthode de prévision du changement basée sur le risque (CPM). En utilisant la combinaison de la probabilité et de l'impact de la combinaison sur la construction de matrices de risques de produits, [Clarkson u. a. \(2004\)](#) ont évalué le risque de propagation des changements de produits. [Koh u. a. \(2012\)](#) ont combiné le CPM et la maison de la qualité (HOQ) pour évaluer les effets de la propagation potentielle des changements à partir de différentes options de changement afin de sélectionner les meilleurs choix de changement qui répondent aux exigences du produit. [Hamraz u. a. \(2012\)](#) ont combiné la méthode de prédiction des changements (CPM) proposée par Clarkson et le modèle combiné fonction-comportement-structure (modèle FBS) et ont présenté un modèle de réseau de connexion FBS, qui utilise les fonctions, le comportement et la structure pour exprimer les connexions cachées entre plusieurs niveaux et pour construire un réseau multicouche. [Li u. a. \(2019\)](#) développent des algorithmes pour simuler le processus de propagation des changements simultanés avec des ressources limitées. [Chen u. a. \(2020\)](#) proposent une règle de partitionnement des caractéristiques du produit pour diviser les composants en caractéristiques du produit en étudiant l'impact des changements internes des produits. Pour analyser la demande de changement, [Giffin u. a. \(2009\)](#) proposent une méthode basée sur le réseau, qui s'appuie sur l'analyse des motifs et la théorie des graphes. Ils définissent un indice de propagation du changement (IPC) pour évaluer la force des changements. [Masmoudi u. a. \(2020\)](#) proposent une méthode de modélisation des dépendances pour faciliter la prédiction des conséquences de la propagation des changements.

Dans notre travail, nous nous intéresserons aux changements créés pour gérer un phénomène d'obsolescence. La méthodologie ORByC exploite les concepts de gestion du changement

via le déploiement de réseaux bayésiens dont les différents intérêts ont été étudiés dans la section 2.5.

Une étude des propagations possibles et des différentes typologies de cette propagation est nécessaire. Dans les sections suivantes, nous aborderons la propagation de l'obsolescence dans l'architecture et dans la chaîne de valeur.

3.3 La chaîne d'approvisionnement considérée

Un problème d'O/DMSMS peut être initié par un fournisseur, par un client ou par la société focale (FC) elle-même. Les conséquences d'un problème O/DMSMS peuvent se propager tout au long de la chaîne logistique s'il n'y a pas moyen de le traiter localement. Une chaîne d'approvisionnement est "un processus de fabrication structuré dans lequel les matières premières sont transformées en produits finis, puis livrées aux clients finaux" selon Beamon (1998). Comme indiqué dans (Chow und Heaver, 1999), une chaîne d'approvisionnement est un groupe de fabricants, de fournisseurs, de distributeurs, de détaillants et de services de transport, d'information et de gestion logistique qui s'occupent de fournir des biens aux consommateurs. La chaîne d'approvisionnement ajoute de la valeur à un produit, des fournisseurs aux clients, tout au long du processus. Pour étudier la propagation possible de l'O/DMSMS tout au long de la chaîne d'approvisionnement, nous considérons une partie générique et épurée d'une chaîne d'approvisionnement, contenant une entreprise focale pour laquelle nous faisons l'étude, ses clients et fournisseurs directs (Figure. 3.1).

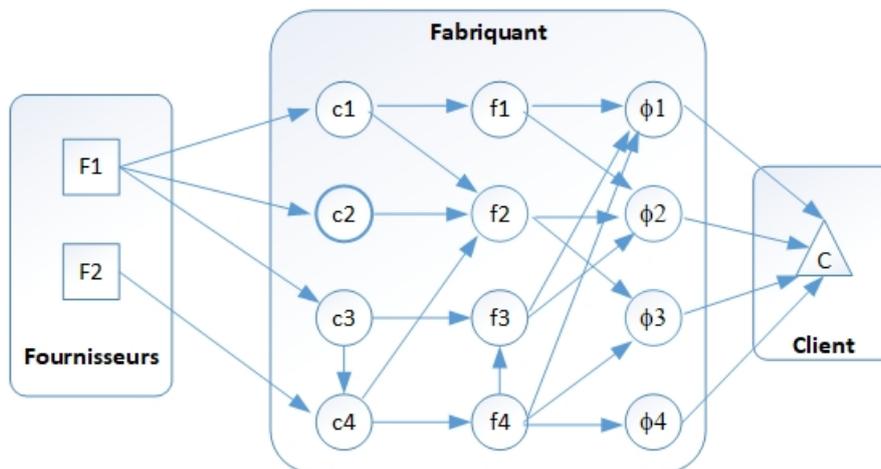


FIGURE 3.1 – La propagation de l'obsolescence dans l'architecture des produits

Ce réseau s'occupe de la livraison des produits aux clients. Un produit peut être étudié de deux points de vue : interne et externe. En interne, la FC conçoit et fabrique le produit. L'architecture du produit est connue par la FC. Les acteurs externes regroupent les clients, les fournisseurs et toutes les autres parties prenantes qui forment l'environnement de la FC. Ils ne connaissent pas entièrement l'architecture du produit. L'O/DMSMS peut provenir de l'une de ces quatre catégories d'acteurs du produit : la FC elle-même, ses clients, ses fournisseurs ou

son environnement. Tout O/DMSMS généré pourrait se propager dans les deux sens tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Supposons que des microprocesseurs soient fournies par un fournisseur S à la FC qui conçoit et produit des tableaux de bord pour un client, un constructeur automobile R. Supposons également que le constructeur automobile notifie que ses acheteurs ou consommateurs ont besoin d'un tableau de bord amélioré contenant un écran d'ordinateur. Si le tableau de bord est conçu et fabriqué par la FC, le problème d'obsolescence généré par le constructeur automobile devient un problème de conception pour la FC. À son tour, la FC peut avoir besoin de renouveler les exigences de certaines microprocesseurs fournies par son fournisseur S, si elle n'a pas la capacité de traiter ce problème d'obsolescence au niveau local. L'obsolescence est alors propagée pas à pas vers la chaîne d'approvisionnement en fonction de la capacité de chaque niveau à "absorber" les nouvelles exigences. On peut ainsi comprendre que la question de l'obsolescence a un impact sur la voiture, le tableau de bord et l'architecture des composants, mais qu'elle se propage également tout au long de la chaîne d'approvisionnement. L'architecture du produit définit alors les schémas de propagation de la problématique O/DMSMS tout au long de la chaîne d'approvisionnement. L'architecture est alors centrale sur laquelle nous nous concentrons pour identifier les chemins de propagation possibles sur tout son long. Si ces chemins de propagation sont correctement identifiés, des solutions peuvent être mises en place pour contrôler (arrêter ou limiter) la propagation de leurs conséquences.

3.4 Propagation d'O/DMSMS

3.4.1 Propagation d'O/DMSMS dans l'architecture du produit

Un système a une structure physique composée d'une structure hiérarchique de composants. Les composants sont définis par un ensemble d'attributs (poids, dimension...). Ils remplissent des fonctions qui sont les transformations qui contribuent à la performance globale du produit (Ulrich, 2003). La cartographie fonction-composant définit la fonctionnalité permettant de satisfaire les exigences des consommateurs. Pour représenter l'interaction entre ces trois catégories d'éléments (composant, fonction et fonctionnalité), il est possible de recourir à des modèles graphiques ou analytiques ou même logique comme la matrice de structure de conception DSM et DMM (définie dans la partie 2.4). Le but étant de représenter la manière la plus explicite possible l'architecture d'un produit ou de tout un système.

Ulrich (1992) définit l'architecture du produit comme "le schéma par lequel les fonctions d'un produit sont attribuées à des composants physiques". Rappelons qu'une fonction transforme les entrées en sorties (Rodenacker, 1971; Sturges u. a., 1996). En d'autres termes, un système est un ensemble interconnecté de composants et de fonctions. Cet ensemble donne une série de fonctionnalités pour répondre aux besoins des utilisateurs. L'architecture renseigne sur les composants du produit, les fonctions élémentaires qu'offre chaque composant et les

fonctionnalités offertes aux utilisateurs. De plus, cette architecture renseigne, d'une manière ou d'une autre, sur la façon dont ces composants fonctionnent ensemble et sur la façon dont ils sont construits, utilisés et assemblés. Ces composants sont des "parties ou sous-ensembles physiques séparables", (Ulrich, 1995).

Si un composant devient obsolète (c2 par exemple dans La Figure.3.1), les autres composants qui ont des liaisons directes ou indirectes avec lui peuvent être affectés. Cependant, chaque composant de l'architecture remplit un ensemble de fonctions. Ainsi, les fonctions des composants obsolètes peuvent également être obsolètes (f2). En outre, l'architecture du système est la combinaison de composants et de fonctions pour répondre aux besoins des clients (fonctionnalités Φ_2 et Φ_3). Ainsi, à leur tour, ces fonctionnalités peuvent également être affectées. Le même raisonnement s'applique si l'obsolescence affecte d'abord la fonction. Elle se propage au composant qui la réalise et à la fonctionnalité. Si le client déclenche l'obsolescence, les fonctions et composants qui offrent ce besoin du client seront donc affectés.

3.4.2 Propagation d'O/DMSMS dans la chaîne logistique

Le produit vit dans deux espaces différents. Le premier est un monde interne qui contient l'entreprise. Le second est un espace externe qui contient le client, le fournisseur et l'environnement (Brezet und Van Hemel, 1997).

Chaque élément de la chaîne d'approvisionnement a une relation directe ou indirecte avec le cycle de vie du produit. En fait, La première phase du cycle de vie est la spécification des besoins des clients. Elle implique une communication détaillée avec le client pour comprendre ses besoins et attentes exacts afin de déterminer les fonctions et les structures. L'activité de conception et de développement du produit consiste à définir les formes, les dispositions des composants, les matériaux, les dimensions structurelles et les architectures. Les dessins techniques, les nomenclatures et les processus de fabrication et de contrôle sont déterminés (Giaccobi, 2009). La phase suivante est la production, puis l'utilisation et enfin la fin de vie.

L'espace extérieur du produit (clients, fournisseurs et environnement) affecte le produit. Par conséquent, il existe quatre voies de propagation de l'obsolescence au sein de la chaîne d'approvisionnement, représentées dans la Figure. 3.2.

- **Propagation en aval : Fournisseur comme déclencheur**

Les fournisseurs approvisionnent le FC en matières premières et des composants spécifiés avec des quantités et des fréquences précises. Des changements dans les exigences techniques des fournitures peuvent avoir un impact sur la FC qui pourrait la transférer à ses clients si elle n'est pas en mesure de la gérer localement. C'est également le cas pour le problème du DMSMS car toute raréfaction des fournitures aurait un impact sur les acteurs en aval. Il s'agit de propagations vers l'avant/en aval. Par exemple, si le fournisseur S des microprocesseurs modifie leurs attributs (par exemple la vitesse de l'horloge), les spécifications techniques du tableau de bord de la FC peuvent être

modifiées, ce qui entraîne la propagation au constructeur automobile R (même si très souvent, l'entreprise focale n'est pas autorisée à modifier ces spécifications techniques en raison d'obligations contractuelles).

- **Propagation en amont : Client comme déclencheur**

Les clients perçoivent les fonctionnalités offertes par le produit et sont également concernés par les attributs des composants et les performances des fonctions. Ils peuvent être à l'origine de l'O/DMSMS en considérant une fonctionnalité comme obsolète. En effet, une fonctionnalité est la résultante de la conjonction entre la structure physique et les fonctions. Son obsolescence affecte la FC et peut ainsi se propager aux fournisseurs. Il s'agit d'une propagation vers l'arrière/en amont. Par exemple, si le constructeur automobile R a besoin d'un écran LCD dans le tableau de bord, la FC doit renouveler la conception du tableau de bord, en demandant des modifications au fournisseur S (un microprocesseur plus performant).

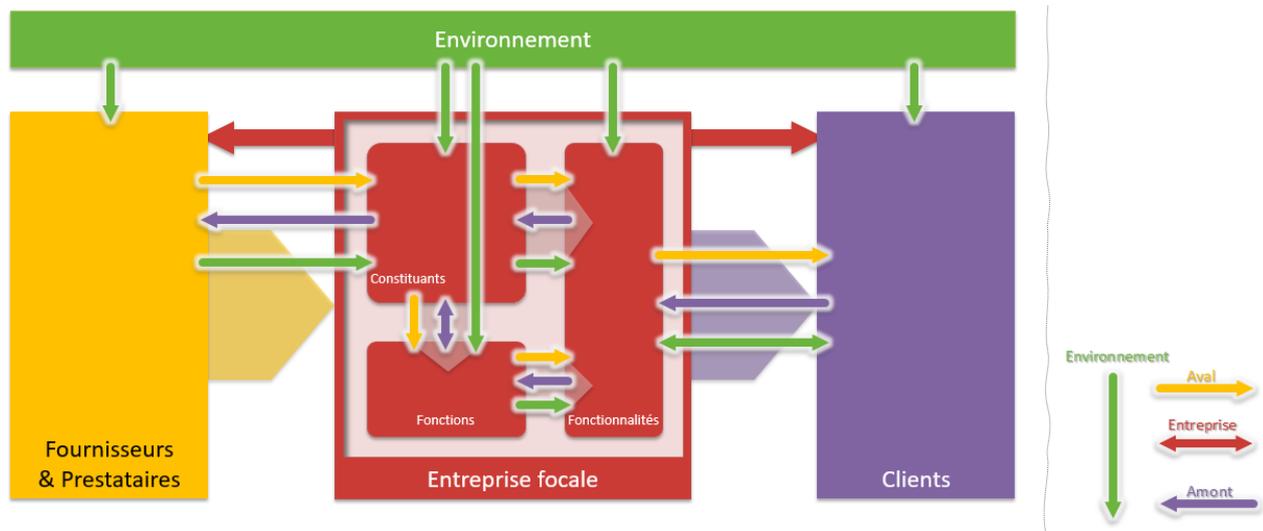


FIGURE 3.2 – Les voies de propagation de l'obsolescence

- **Propagation à l'initiative du FC :**

La FC pourrait innover et modifier les composants et/ou les fonctions de ses produits, et ce, de manière unilatérale. Dans ce cas, les modifications de l'architecture atteindraient le client et changeraient les approvisionnements. La FC peut apporter des changements sur les composants au près du fournisseur. Par exemple, si la FC fait évoluer le tableau de bord en intégrant un écran tactile, rendant le ancien tableau de bord obsolète. Le constructeur automobile R doit faire face à cette interruption soit en réalisant un dernier ordre d'achat (Last Buy Order, LBO) par exemple, soit en intégrant le nouveau tableau de bord dans le design intérieur des voitures. Le fournisseur S peut également être affecté parce que les microprocesseurs utilisés peuvent ne pas être adaptées pour le nouveau

tableau de bord.

- **Propagation initiée par l'environnement :**

L'environnement impose des contraintes à la conception, à la fabrication, à l'utilisation et au recyclage. L'exemple d'événement qui peut entraîner des changements à tous ces niveaux est celui de réglementation internationale ou nationale (e.g. nouvelles performances CO₂). Ces O/DMSMS peuvent affecter tous les acteurs de la chaîne de valeur (fournisseurs, FC et clients). Dans ce cas, on peut avoir tous les trois chemins de propagation (propagation vers l'avant, vers l'arrière et à l'initiative de la FC). Par exemple, les règles de recyclage imposées par les normes peuvent être appliquées au constructeur automobile R en limitant l'utilisation de certains matériaux venant du fournisseur. Cela pourrait être transformé en nouvelles spécifications pour la FC.

3.5 Barrières entourant l'O/DMSMS

Pour simplifier l'étude, nous mettons en suspens la propagation induite par l'environnement et nous retenons les chemins de propagation dans la chaîne de valeur. Nous classons les propagations en deux groupes ; un groupe causé par l'obsolescence qui contient les propagations en avant, en arrière et à l'initiative de la FC. Ces propagations affectent l'architecture du système. Le second groupe est causé par le DMSMS qui ne contient que la propagation vers l'avant parce qu'il y a des problèmes d'approvisionnement en composants. Après avoir déterminé les différentes voies de propagation possibles de l'obsolescence, la question est maintenant de limiter ces propagations. En d'autres termes, pouvons-nous mettre en place des barrières pour couper ces propagations ? Puisque les propagations sont causées soit par l'obsolescence, soit par le DMSMS, on peut distinguer deux types de barrières : les barrières techniques et les barrières de fabrication réduisant, respectivement, les conséquences de l'obsolescence et du DMSMS. Une barrière est une solution qui permet de traiter le problème des O/DMSMS localement ou qui réduit les conséquences potentielles empêchant leur propagation dans n'importe quelle direction.

3.5.1 Barrière technique : une solution au problème de l'obsolescence

L'obsolescence touche les caractéristiques du produit (fonctions et composants). Les barrières techniques sont les modifications de l'architecture du système obtenues lors de la phase de conception pour rendre le système aussi résistant que possible à l'O/DMSMS. Soit la modélisation de l'architecture d'un produit en étendant la représentation suggérée par (Holley u. a., 2011) dans la Figure. 3.3.

Les vues internes et externes du produit sont séparées par les lignes verticales oranges dans la figure. Chaque case représente une matrice. C/C , F/F et C/F sont les matrices qui modélisent respectivement les composants et le lien fonctionnel, ainsi que la correspondance

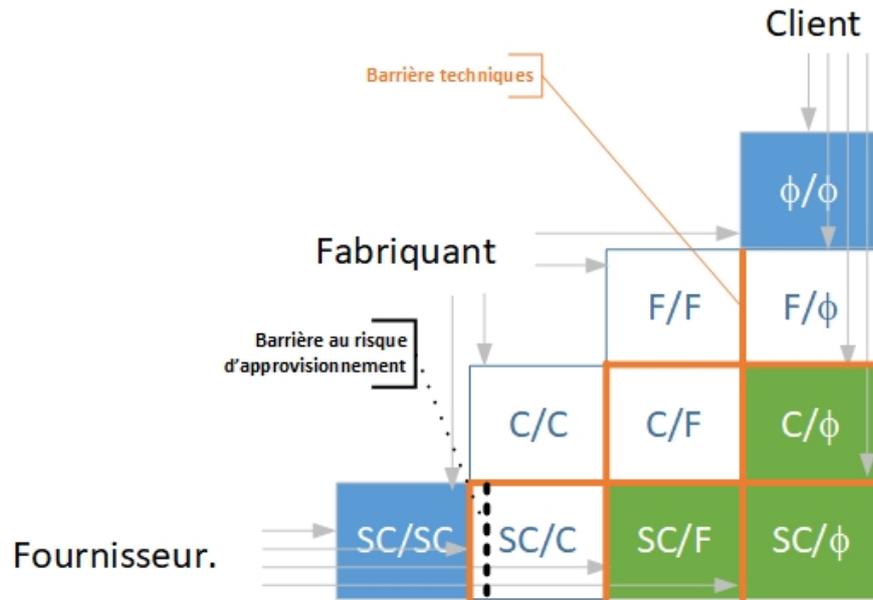


FIGURE 3.3 – Propagation de l'O/DMSMS à travers l'architecture du produits et la chaîne d'approvisionnement

entre les composants et les fonctions. Ensemble, elles définissent l'architecture du produit. Les composants sont fournis par le côté approvisionnement de la chaîne d'approvisionnement, modélisé par SC/C . SC/SC montre les interdépendances des fournisseurs, le cas échéant. Elles peuvent être explicites et imposées par FC. Dans tous les cas, ces dépendances existent même implicitement par le biais du lien C/C . L'analyse de l'architecture des produits peut conduire la FC à associer certains fournisseurs aux fonctions requises des produits. Cela pourrait être le cas de l'association d'un fournisseur donné à la fonction "transformation AC/DC réglementée". Ces relations sont modélisées à travers la matrice SC/F . Les fonctions sont utilisées pour réaliser certaines fonctionnalités attendues par le client, modélisées par F/Φ . Les interdépendances des fonctionnalités sont modélisées par Φ/Φ . C'est le cas de l'accès à la "fonction haute-fidélité audio" et à la "conversion MP3 à grande vitesse", deux fonctionnalités destinées aux consommateurs finaux de la voiture. Sur la base de l'analyse interne de l'entreprise, il serait possible de faire correspondre les fonctionnalités attendues par les clients à la structure interne du produit par le biais de C/Φ . Enfin, il devient possible de relier les fonctionnalités des clients aux fournisseurs par le biais de SC/Φ . Il est alors possible de prévoir les éventuelles modifications du côté de l'offre de la chaîne d'approvisionnement en étudiant les fonctionnalités que les clients demandent. Même si ces matrices ne sont pas toutes disponibles, l'exploration des domaines, des dépendances et des liens entre les domaines permet de naviguer dans ce modèle. Toutes ces matrices sont des matrices de contiguïté et peuvent être transformées en graphiques pour n'importe quel usage algorithmique. Ainsi défini, l'ensemble du modèle inter-connecté est appelé ici le modèle de liaison produit/chaîne d'approvisionnement.

Pour faire face à l'obsolescence, la FC devrait utiliser les barrières techniques que nous définissons comme : "les techniques qui permettent de contrôler ou de minimiser la propagation de l'obsolescence dans l'architecture du produit ou vers l'extérieur de la FC". Les lignes oranges dans le modèle de la Figure.3.3 montrent les barrières techniques possibles qui peuvent être mises en place afin de limiter la propagation de l'obsolescence. Les flèches noires montrent les différents impacts possibles de tout problème d'obsolescence généré par le client, le fournisseur ou la FC.

A travers les matrices F/Φ , F/F , C/F , C/C , l'objectif est de limiter au maximum le couplage dans les fonctions, les fonctions/fonctionnalités, les composants/fonctions et les composants/fonctions. Il s'agit de concevoir le produit de manière à ce que les matrices de couplage soient autant que possible diagonales. Dans le contexte de la SC/C , cela signifie que pendant la conception, il s'agira de coordonner les apports des fournisseurs avec les stratégies globales de conception du produit définies. Le Tableau. 3.1 fournit une liste de techniques possibles pour construire une barrière technique dans l'architecture des produits.

TABLE 3.1 – Barrières Techniques

Barrières techniques	Définition	Rôle dans l'O/DMSMS	Avantages	inconvénients
Modularisation	La modularisation est l'activité par laquelle un produit complexe est décomposé en blocs ou ensembles de composants (Miller und Elgard, 1998) appelés "modules" (Hölttä-Otto u. a., 2005).	Elle offre des composants indépendants, reliés, par des interfaces standard. Si l'obsolescence affecte l'un de ces ensembles, il suffit de le remplacer par un autre sans affecter l'architecture.	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilité des produits - Large variété - Réutiliser - Faciliter la gestion des projets - Faciliter le recyclage des produits (Hölttä-Otto u. a., 2005). 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus nous utilisons de modules dans un produit, plus ses performances sont affectées (Hölttä-Otto u. a., 2005) - Une perte d'identité de la marque - Rendre un produit plus lourd (Hölttä-Otto u. a., 2005)
Standardisation	"Déterminer des réglementations pour des usages généraux et multiples, en ce qui concerne les problèmes réels ou potentiels, de manière à obtenir un niveau d'aménagement optimal dans le contexte donné" (Galvin, 2001), (Krstić u. a., 2015).	Les interfaces standard stoppent la propagation de l'obsolescence. Grâce à cette interface, le composant obsolète est remplacé sans causer d'effets négatifs sur le système.	<ul style="list-style-type: none"> - Faciliter l'échange de produits et de services et - Développer la coopération dans plusieurs domaines (Weber u. a., 2002) et - Créer une compréhension commune. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de consommation, -Retard dans le TTM (time to make) (Weber u. a., 2002) et - Limiter la créativité et l'innovation (Weber u. a., 2002).

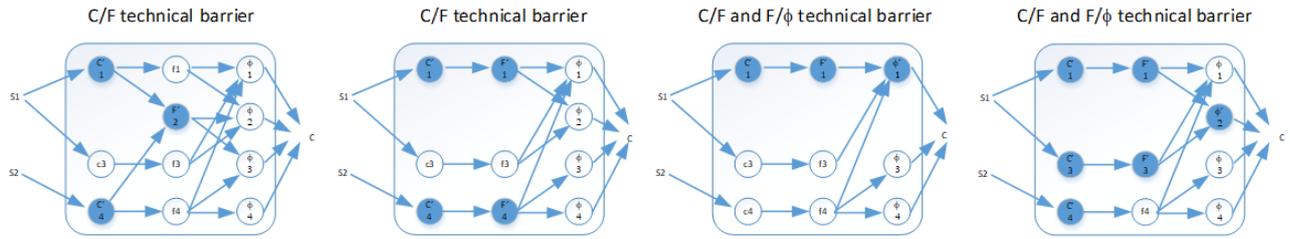


FIGURE 3.4 – Illustration des barrières techniques au sein de l'architecture du produit

Points communs	Le point commun est l'utilisation, à plusieurs reprises, de la même pièce/composante dans différents endroits d'un produit final (Ashayeri und Selen, 2005).	Leur utilisation réduit les TTM, accélère l'introduction de nouvelles technologies et répond aux nouvelles exigences des clients. Elle minimise le risque d'obsolescence provenant de la FC et du client.	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire le niveau de l'inventaire - Améliorer la flexibilité - Réduire le temps de préparation et augmenter la productivité - Simplifier la planification et l'ordonnement - Diminuer le délai d'exécution (Wazed u. a., 2008). 	<ul style="list-style-type: none"> - Les points communs exigent une approche trop spécifique et surdimensionnée (Wickenberg u. a., 2011). - L'utilisation d'un même composant entraîne une distorsion de la marque sur un produit.
Personnalisation	La personnalisation est la conception d'un produit basé sur les besoins et les exigences des clients. Elle augmente la flexibilité de la production (Krstić u. a., 2015).	Elle peut constituer une barrière technique important à l'obsolescence provenant des clients.	<ul style="list-style-type: none"> - Augmenter des ventes (Krstić u. a., 2015) - Créer une plus grande intimité entre la FC et les clients. 	Les changements de la demande affectent les sous-systèmes de production et nécessitent l'engagement des activités d'ingénierie pour traduire les demandes en fonctions et en structures (Krstić u. a., 2015).

La Figure. 3.4 présente une illustration des barrières techniques utilisées lors de la conception du produit. Si un problème d'obsolescence est lancé pour le composant c_2 , l'utilisation potentielle de C/F et F/Φ permettrait de le traiter localement en évitant la propagation de l'obsolescence au client. Quatre solutions possibles sont présentées ici ; la meilleure doit être déterminée pour trouver des compromis entre coût et efficacité.

3.5.2 Barrière au risque d'approvisionnement : une solution au problème des DMSMS

Tout au long de la chaîne de valeur, il peut y avoir des discontinuités dans l'approvisionnement du composant causées par le DMSMS. Les sources du DMSMS sont multiples comme mentionné dans la section 2.2.3. La barrière au risque d'approvisionnement consiste à renforcer la résilience du processus de rarefaction de la chaîne d'approvisionnement. Ces barrières permettent de limiter les effets de la rarefaction et sont liées à la voie élémentaire $SC - C$. Les stratégies les plus pratiquées de réduction des risques de la chaîne d'approvisionnement



FIGURE 3.5 – Le processus de SCRM (Charles u. a., 2015)

sont présentées ci-dessous :

- **Multi-sourcing.** Elle réduit la dépendance à l'égard d'une source d'approvisionnement unique et du recours à des sources d'approvisionnement doubles ou multiples (Tomlin, 2006). En 2000, par exemple, un incendie dans une usine de Philips Electronics au Nouveau-Mexique a interrompu la fourniture de puces téléphoniques essentielles pour deux clients : Nokia et Ericsson. Nokia a rapidement réagi en transférant son approvisionnement vers d'autres usines, tandis qu'Ericsson a perdu un mois de production parce qu'elle utilisait une seule source (Tomlin, 2006).
- **Alternatives pour la distribution et le transport.** Lorsque la FC rencontre de nombreux problèmes logistiques, il est nécessaire de disposer d'autres alternatives de transport ou de distribution pour assurer la satisfaction du client au moment et à l'endroit prévus.
- **La coopération.** Les éléments de la chaîne de valeur doivent échanger et partager différentes données et informations sur la situation réelle. Cela peut être une solution utile pour anticiper ou réduire les risques inattendus. Par exemple, une entreprise qui risque de perdre un fournisseur essentiel doit informer ses clients afin de trouver des solutions pour minimiser les coûts générés par ce changement.
- **Gestion des risques de la chaîne d'approvisionnement (SCRM).** La culture SCRM est un moyen important d'atténuer les risques tout au long de la chaîne de valeur. Selon Artebrant u. a. (2004), la SCRM est "l'identification et la gestion des risques au sein de la chaîne d'approvisionnement et des risques externes à celle-ci par une approche coordonnée entre les membres de la chaîne d'approvisionnement afin de réduire

la vulnérabilité de la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble". Le processus SCRM comprend quatre étapes : identifier, quantifier, atténuer et réagir, cf. Figure. 3.5.

3.6 Conclusions

Des modifications de la conception des produits et des systèmes sont nécessaires pour suivre les progrès technologiques et fournir des solutions innovantes ou tout au moins plus performantes afin de maintenir l'avantage concurrentiel de l'entreprise. Par conséquent, des modifications sont continuellement apportées tant sur les constituants d'un produit que sur les fonctionnalités qu'il offre. Ces modifications raccourcissent de fait leur propre cycle de vie induisant de l'obsolescence en amont et en aval de ce produit. L'obsolescence provoque ainsi des ruptures d'adéquation entre les besoins et les spécifications lorsque le DMSMS fait face à la disponibilité des composants.

Les problèmes liés à l'O/DMSMS se propagent dans l'architecture du produit et dans la chaîne d'approvisionnement qui le soutient. S'il n'est pas bien géré, l'O/DMSMS entraînera des coûts excessifs et de graves problèmes tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Pour en limiter les risques, plusieurs approches de remédiation sont utilisées pour peu que l'on puisse identifier l'ensemble des conséquences. Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre et d'appréhender les mécanismes de propagation de l'O/DMSMS à travers l'architecture du système et la chaîne de valeur associée. C'est à cela que le présent chapitre a été dédié et dans lequel nous nous sommes attachés à identifier les principaux chemins de propagation au sein de la chaîne d'approvisionnement et à les relier à l'architecture du produit. Les solutions possibles pour atténuer ces risques se présentent sous la forme de barrières de deux types : barrière technique et barrière au risque d'approvisionnement. La première touche l'architecture du système et sert à circonscrire l'obsolescence provenant du client à travers l'architecture. La seconde s'efforce d'absorber les perturbations voire les discontinuités d'approvisionnement induites par le DMSMS. La transcription par différentes matrices des dépendances endogènes et exogènes quant à l'architecture du produit servira à expliciter les barrières à travers des graphes dans une approche bayésienne. Celle-ci est présentée au chapitre n°5 pour évaluer les risques de l'obsolescence par propagation tout au long de la chaîne d'approvisionnement et de l'architecture du produit en intégrant l'incertitude, afin d'évaluer sa résilience à l'obsolescence.

Chapitre 4

La résilience à l'obsolescence

4.1 Introduction

L'innovation incessante dans la conception et la réduction du cycle de vie des composants utilisés font subir aux entreprises de plus en plus de perturbations (changements dans la demande des clients et indisponibilité des matières premières) qu'elles doivent, au plus tôt, identifier, anticiper et traiter. Les notions de résilience et de robustesse sont plus que jamais d'actualité dans les travaux de recherche mais leur emploi parfois dans la littérature scientifique et souvent dans le milieu industriel reste à préciser tant la nuance n'est pas toujours évidente à discerner.

L'évolution de la notion de résilience est le résultat de toute une chaîne de processus de transfert entre divers domaines de la connaissance et de la science. D'après [Klein u. a. \(2003\)](#), le terme dérive du mot latin "resilio" qui signifie "sauter en arrière", "rebondir", "réfléchir" ou "revenir". Le mot se retrouve à partir de l'année 1430 dans le français de la fin du Moyen Âge et du début de l'époque moderne comme terme juridique pour la résiliation d'un contrat et, en général, pour le rétablissement de la situation juridique initiale. Au cours de la seconde moitié du XVIIe siècle, la "résilience" est devenue un terme courant pour désigner les contre-réactions physiques et le retour à l'état initial. Pour Samuel Gott, auteur d'une histoire naturelle et d'une cosmologie publiée en 1670, la résilience ("retour ou restitution") constitue le terme générique de l'"élasticité" des gaz et des liquides, d'une part, et du "ressort" des corps solides, d'autre part, ([Gott, 1968](#)). Les domaines dans lesquels le terme aurait été utilisé pour la première fois au siècle dernier est ceux de la psychologie et de la psychiatrie (années quarante).

4.2 La résilience de système

Le concept de résilience a été étendu aux systèmes par [Holling \(1973\)](#), comme la capacité des systèmes écologiques à "*absorber les changements des variables d'état, des variables motrices et des paramètres, et à persister*". Depuis lors, le mot a été adapté et réinventé pour désigner la capacité des systèmes à anticiper, supporter et récupérer des chocs externes, ainsi que la capacité à faire face aux changements en général ([Martinson, 2017](#); [Field u. a., 2012](#)).

Le terme de résilience des systèmes est un domaine de recherche en pleine expansion. La Figure 4.1, produite par Google Books Ngram Viewer, illustre cette tendance reconstituée à partir de l'usage de ce terme à travers le corpus Google Books¹. En entreprenant un examen de la littérature sur la résilience, [Bhamra u. a. \(2011\)](#) ont constaté que la résilience s'est avérée être un sujet multidisciplinaire et à multiples facettes, couvrant plusieurs domaines. A titre d'exemple, le terme de résilience – issu de l'article de [Holling \(1973\)](#) – est employé pour qualifier la stabilité des écosystèmes.

1. Le Google Books Ngram Viewer est un ensemble de données publiques et dynamiques, qui constitue également de la littérature grise.



FIGURE 4.1 – Bibliométrie via Google Livres pour 'System(s) Resilience', de Source de données : Google Books Ngram Viewer (<http://books.google.com/ngrams>)

Manyena (2006) a souligné que des références encore plus anciennes du terme résilience se trouvent dans les travaux de Garnezy et Werner und Smith dans le domaine de la psychiatrie dans les années 1940.

Plus récemment au siècle dernier, en physique et en ingénierie, le terme "résilience" décrit la propriété d'un matériau d'absorber de l'énergie lorsqu'il est déformé de manière élastique pour reprendre sa forme initiale et restituant de nouveau cette énergie. Plus tard, le concept de résilience a été établi dans le domaine de l'écologie par Holling (1973), qui a déclaré que la résilience d'un système écologique est "une mesure de la persistance des systèmes et de leur capacité à absorber les changements et les perturbations tout en maintenant les mêmes relations entre les populations ou les variables d'état. La stabilité représente la capacité d'un système à revenir à un état d'équilibre après une perturbation temporaire ; plus il revient rapidement à l'équilibre et moins il fluctue, plus il est stable".

4.2.1 Les définitions de la résilience dans la littérature

La résilience a été définie en incluant les aspects techniques, organisationnels, sociaux et économiques (Bruneau und Reinhorn, 2004). Diverses tentatives ont été faites pour fournir une définition complète, mais une récente revue de la littérature constituée par Manyena (2006) souligne que la définition actuelle est trop vague pour être utile dans le domaine de la réduction des risques de catastrophes. Dans sa recherche, Manyena (2006) examine le concept de résilience en termes de questions de définition, de sa relation avec le concept de vulnérabilité, de son application dans le domaine de la gestion des catastrophes et de la déduction des risques. Manyena (2006), évaluant toutes les définitions possibles fournies depuis les années 90 jusqu'à nos jours, suggère que la résilience pourrait être considérée comme la "capacité intrinsèque d'un système, d'une communauté ou d'une société prédisposée à un choc ou à un stress, à s'adapter et à survivre en changeant ses attributs non essentiels et en

se reconstruisant”.

La Table. 4.1 rassemble les définitions de résilience par domaine pour permettre de mieux appréhender les différentes perceptions que l'on peut en avoir. A ce titre, la section suivante se focaliser sur une confusion récurrente dans l'ingénierie en général et pour mieux la dissiper.

4.2.2 La résilience et la robustesse

Comme pour tout engouement et intérêt croissants pour un nouveau concept dans un domaine donné emprunté d'un autre, le risque est souvent de mal percevoir ses subtilités et ses particularités selon le champ d'application par exemple. Comme évoqué précédemment, la résilience a conduit aussi à une confusion sur son concept comme le corroborent plusieurs auteurs comme récemment Henry und Ramirez-Marquez (2012) et Ganin u. a. (2017). Ces derniers précisent que cela vient principalement d'un manque de consensus et de rigueur dans l'usage du terme d'autant plus que ce terme recouvre d'autres concepts tel que la robustesse. La confusion devient alors récurrente comme l'expliquent Ganin u. a. (2017).

En effet, l'utilisation des termes résilience et robustesse devient présente fortement dès 1987 mais ce n'est que depuis 2012 que ces deux concepts sont régulièrement associés et discutés en même temps dans une même publication (Clément u. a., 2018). Les travaux de Urruty u. a. (2016); Brandon-Jones u. a. (2014); Clément u. a. (2018) proposent, dans ce sens, plusieurs définitions de la résilience et de la robustesse dans différents domaines. Parmi elles, nous mentionnons la définition et la comparaison intéressante faites par (Urruty u. a., 2016). La contribution se focalise uniquement aux domaines de l'agriculture et de la biologie avec des définitions de la robustesse et de la résilience qu'ils généralisent comme suit :

”La robustesse est la capacité à maintenir les niveaux souhaités de production agricole malgré l'apparition de perturbations”.

”La résilience est la capacité d'absorber les changements et d'anticiper les perturbations futures grâce à la capacité d'adaptation.”

Une représentation graphique de ces deux concepts est donnée par la Figure.4.2 pour expliciter la nuance. La notion de robustesse est basée sur le fait que la perturbation ne compromet pas la performance attendue du système. Cela suppose, en effet, que cette perturbation soit raisonnable et limitée quant aux aptitudes propres du système. La notion de résilience est basée sur le principe d'adaptation selon lequel il y aurait d'abord une phase d'absorption de la perturbation puis un retour à l'état initial. Ce phénomène s'observe lorsque la perturbation est trop importante relativement à la conception même du système.

Le temps que met le système à absorber cette perturbation et à revenir à un état nominal peut être un indicateur du niveau de résilience. Concernant la robustesse, le niveau de perturbation (intensité) que le système peut accepter sans compromettre sa performance peut exprimer son niveau de robustesse.

Dans l'ensemble, les définitions de la robustesse et de la résilience ne sont pas forcément

TABLE 4.1 – Définition de la résilience

Domaine	Référence	Définition
Ingénierie	Ibanez (2016) u. a.	La résilience est la capacité de minimiser et de récupérer des conséquences d'un événement indésirable, [...] pour un état donné du système.
	Zhu und Basar (2015)	L'aspect résilience d'un système, qui fait référence à la capacité du système à se rétablir en ligne après la survenue d'événements adverses.
	Wybo (2008)	La résilience correspond à la capacité de l'organisation (à tout niveau) à continuer d'accomplir ses tâches en adaptant son fonctionnement aux situations dangereuses, à l'incertitude, à la pression du temps et aux menaces.
Informatique	Greco (2012) u. a.	Des indices de résilience ont été introduits afin d'évaluer l'utilité de l'excédent de hauteur de pression dans des conditions normales d'exploitation pour permettre au réseau de surmonter des conditions d'exploitation critiques.
	Read (2005)	Il convient de faire la distinction entre la robustesse et la résilience d'un système par la manière dont le système répond aux impulsions transitoires. Les systèmes humains sont complexes en raison de la capacité des humains non seulement à réagir et à répondre à leur environnement, mais aussi à construire des "environnements" abstraits/symboliques - les cultures - qui sont aussi réels en termes d'influence sur le comportement que l'environnement matériel dans lequel les individus sont intégrés.
Environnement	Dragicevic (2016)	Il est considéré comme résilient lorsqu'il s'adapte à des perturbations externes tout en continuant à fonctionner, que ce soit au prix de changements de configuration.
	Mumby (2014) u. a.	La résilience est la capacité d'un système à rester capable de présenter des trajectoires de récupération même si les perturbations peuvent pousser le récif vers un ensemble de seuils qui marquent le point où la mortalité des coraux l'emporte sur la récupération.
	Anderies (2013) u. a.	La capacité à supporter un choc et à continuer à fonctionner et, plus généralement, à faire face au changement.
Biologie	Prostova (2015) u. a.	Ce rétablissement en trois étapes du phénotype de type sauvage après son altération - acquisition temporaire d'une conformation fonctionnelle, obtention de mutations correctrices et sélection négative - a été mis en évidence.
	Butler und Silver (2009)	La résilience est la capacité à maintenir un niveau acceptable de fonctionnement face à diverses agressions qui remettent en cause le fonctionnement normal et complet.

confuses dans tous les domaines mais on constate qu'elles présentent de fortes similitudes. Pour la robustesse, les auteurs parlent d'un état initial et du fait que la robustesse est qualifiée par rapport à la perturbation qui ne doit pas le modifier dans ses principales fonctionnalités. Pour

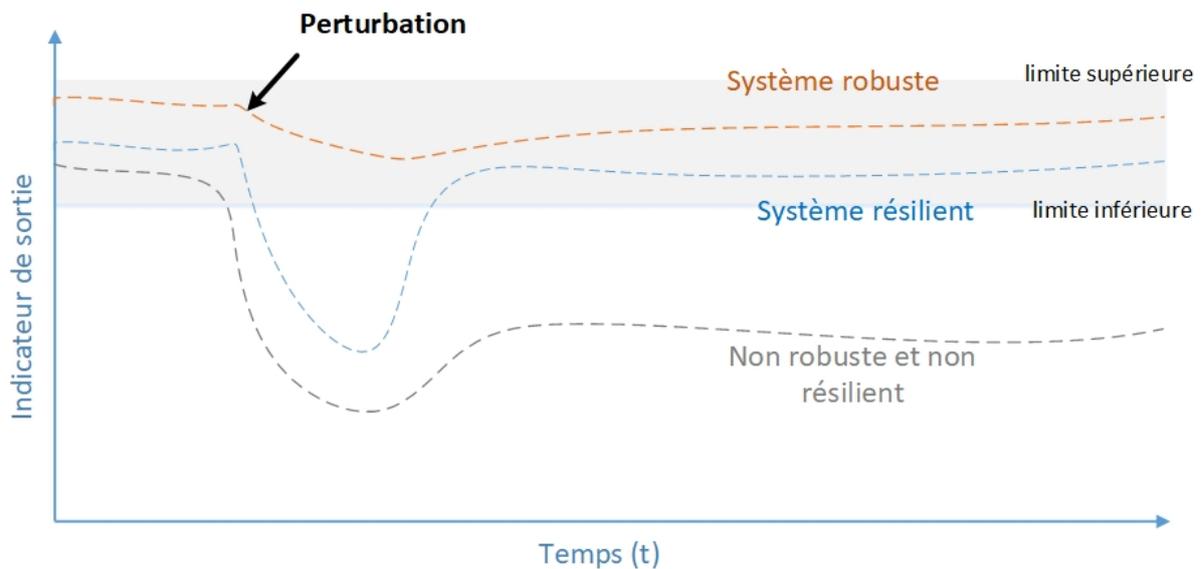


FIGURE 4.2 – La résilience et la robustesse

la résilience, les auteurs établissent un consensus sur la capacité du système à s'adapter à une perturbation jusqu'à revenir à son état initial. Cette adaptation s'écrit souvent en deux phases : la réaction à la perturbation et la réponse pour revenir à l'état initial, (Clément u. a., 2018).

Sur cette base, nous proposons nos définitions de la résilience et de la robustesse auxquelles nous nous attellerons tout au long de nos présents travaux :

La robustesse est la capacité d'un système à maintenir son fonctionnement à des niveaux de performance tolérés face à des perturbations défavorables aux conditions de fonctionnement.

La résilience est la capacité d'un système à revenir à son fonctionnement pour des niveaux de performance acceptables tout en absorbant les perturbations voire les changements afin de maintenir la fonction du système.

4.3 La résilience à l'obsolescence (Obso-Résilience)

Dans notre étude, nous ne nous intéressons pas à la robustesse du système suite à l'apparition de l'obsolescence. En effet, si le système est capable d'absorber les effets d'une obsolescence et que celle-ci n'induit pas de dégradation du fonctionnement ou des performances attendues du système, aucune action n'est appliquée. Dans ce cas, on dit que le système est insensible à cette obsolescence compte-tenu de sa robustesse.

Si après avoir opéré des changements et induit des perturbations pour gérer l'obsolescence,

il y a une dégradation des performances qui les amènent hors tolérance indiquée par les spécifications de conception, une remédiation à cette obsolescence s'impose. Il s'agira alors de ramener le système au niveau de performance nominal ou accepté dans les limites des tolérances. Dès lors que ça se réalise, on parlera alors d'un système résilient. A l'apparition d'un évènement d'obsolescence, ce système a eu la capacité à revenir à un état de fonctionnement souhaité après une période de performances dégradées et moyennant un processus d'adaptation ... de remédiation.

4.3.1 Définition d'Obso-Résilience

Dans la littérature, il n'y a que le travail de [Zolghadri u. a. \(2018\)](#) qui s'attelle à définir la résilience à l'obsolescence. Ce travail étudie le mécanisme de propagation de l'obsolescence et de la raréfaction (O/DMSMS) dans l'architecture. Ils considèrent la résilience comme étant "la capacité à contenir localement un O/DMSMS". "La résilience finale est une fonction de toutes les solutions de remédiation de l'O/DMSMS pour ses éléments. D'une manière ou d'une autre, ces solutions protègent les nœuds dépendants des impacts de l'obsolescence," ([Zolghadri u. a., 2018](#)). Ils considèrent la résilience à l'obsolescence comme une capacité à trouver une solution qui protège l'élément du système de l'impact de l'obsolescence qui se propage. La définition proposée n'est pas précise et la quantification de la résilience n'est pas développée.

Le fait qu'un système reste le plus longtemps possible à l'abri des changements imposés par l'obsolescence est appelé résilience. Elle détermine donc la capacité du système à continuer à fournir ses services tout en ayant au moins un composant, une fonction ou une technologie obsolète. La résilience à l'obsolescence est une propriété intrinsèque du système, conçu ou à concevoir, qui lui permet de fournir la fonctionnalité attendue, tout en répondant aux exigences fonctionnelles et non fonctionnelles, malgré l'apparition de l'obsolescence. Sur la base de ces constructions de ce concept, nous adoptons la définition de la résilience à l'obsolescence suivante :

La résilience à l'obsolescence (l'obso-Résilience) est l'aptitude d'un système à rester conforme par rapport à un ensemble d'exigences maintenues ou modifiées suite à l'implémentation des solutions dès l'apparition d'une obsolescence.

Cette aptitude s'apprécie à travers l'évaluation d'un processus d'adaptation à l'obsolescence présenté à la section suivante.

4.3.2 Le processus d'Obso-Résilience

L'étude de la résilience à l'obsolescence peut être décrite par un processus d'actions et de décisions à prendre (voir le Figure 4.3). Ce processus est déclenché notamment par un

événement qui modifie une exigence ou par l'apparition de meilleures performances rendant les précédentes en vigueur non satisfaisante.

Cette première étape nécessite une analyse des notifications techniques. Ces notifications indiquent soit un changement d'exigence que nous noterons RCN (*requirement change notification*), soit la suppression d'une exigence que nous noterons RDN (*requirement discontinuance notification*). Elles peuvent être générées par le client qui déclenche une obsolescence des performances ou des fonctionnalités du système. Une source externe, telle qu'une nouvelle législation environnementale (e.g. un changement de la norme relative aux émissions carbone), peut également être à l'origine de la suppression ou de la modification d'une exigence. Après avoir traité les RCNs et les RDNs, il faut identifier les sources d'obsolescence avérées. Ici, on détermine le périmètre de l'obsolescence : quelle fonctionnalité, quel sous-système, quelles fonctions sont concernées par l'obsolescence. L'étape suivante consiste alors à rechercher le plus de solutions admissibles pour les éléments obsolètes issus de chaque source d'obsolescence.

Chaque solution j d'une source d'obsolescence i évaluée quant à son aptitude à l'obso-résilience de manière à pouvoir la retenir ou la considérer comme une solution non viable (à rejeter). Il s'agit d'une phase que nous appelons "quantification de la résilience". Lorsque toutes les solutions auraient été évaluées de la sorte, une d'elle devra être désignée pour être implémentée. Elle devra être sélectionnée par des méthodes d'optimisation multicritères dans la mesure où cette quantification repose sur plusieurs dimensions et qui fait l'objet de la section 4.4. La dernière étape consiste à reproduire le même cheminement pour une éventuelle autre source d'obsolescence.

4.4 Évaluation la résilience à l'obsolescence

Nous devons définir les critères permettant d'assurer l'obso-Resilience. Sa quantification est assurée par l'étude de **l'efficacité et de l'efficience** de la stratégie de remédiation à l'obsolescence. L'efficience consiste à "bien faire le travail", en anglais "*doing things right*." Et l'efficacité consiste à "faire ce qu'il faut", en anglais "*doing the right things*".

Nous nous inspirons des travaux de [Gibert \(1980\)](#) sur la performance. Il place la performance au centre du triangle efficience, efficacité et pertinence. Ces notions peuvent être définies dans le triptyque : objectifs, moyens, résultats. Dans notre travail, les objectifs sont le respect et la satisfaction des exigences du système face à l'obsolescence. Les résultats sont les taux de performance des systèmes suite à l'application d'une stratégie de gestion des obsolescences. Les moyens sont les coûts et le temps de mise en œuvre de cette stratégie de gestion, voir la Figure. 4.4.

La distance entre les objectifs et les résultats définit l'efficacité. La solution choisie de remédiation à la source d'obsolescence doit garantir la résilience en fournissant des valeurs de performance acceptées (dans les intervalles de tolérance). L'efficacité, notée E sera alors un des critères d'évaluation de la résilience à l'obsolescence.

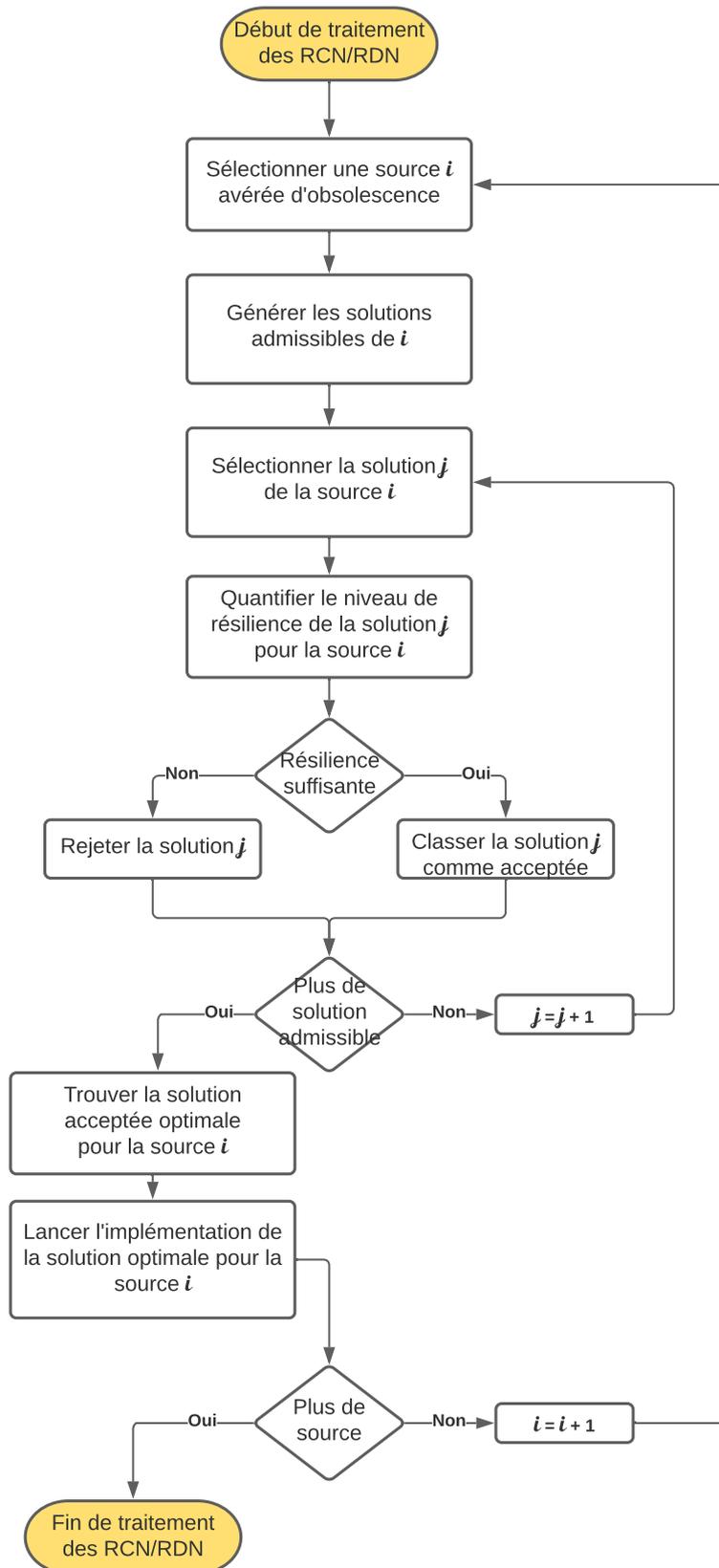


FIGURE 4.3 – Le processus d'étude de la résilience à l'obsolescence

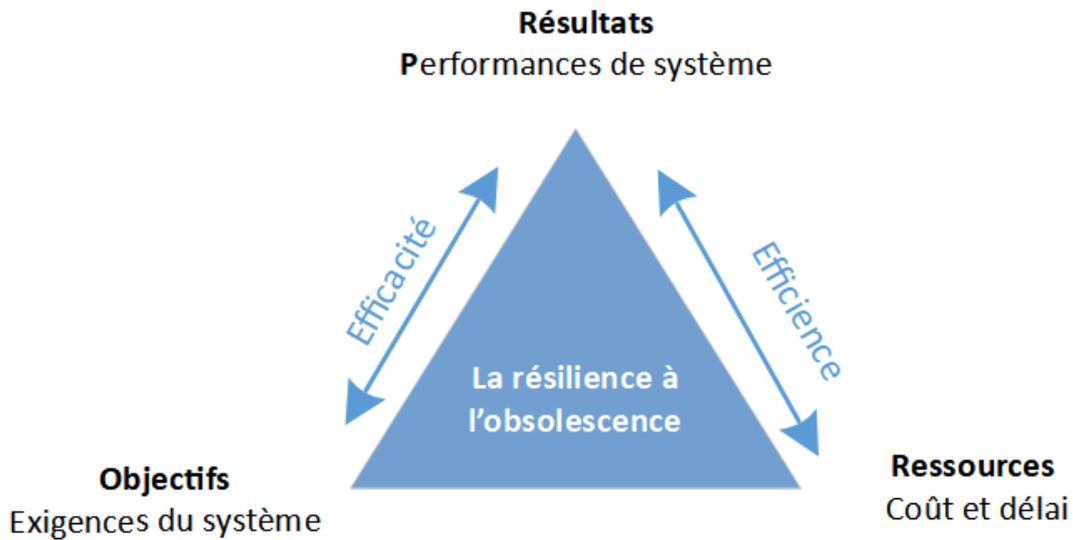


FIGURE 4.4 – Triangle de résilience à l'obsolescence

Le compromis entre les résultats et les moyens définit la mise en oeuvre pour atteindre les objectifs de performance, représente l'efficience. La stratégie doit être la moins coûteuse et la plus rapide. Ainsi, le coût et le temps sont des critères importants dans le choix d'une solution. Si l'obsolescence affecte un composant ou une unité entière du système, la mise en oeuvre d'une remédiation pour gérer l'obsolescence nécessite un temps de récupération. Par exemple, si l'on veut remédier à l'obsolescence d'un microprocesseur, on le remplacera soit, par un autre, soit par le changement de l'unité entière où la nouvelle comportera d'autres microprocesseurs et composants dans un ensemble qui rend les mêmes fonctionnalités. Le temps nécessaire pour trouver une solution et de l'implémenter dans le système est appelé "le temps de recouvrement", noté T . Nous désignons ce temps de récupération d'une solution comme le deuxième critère pour quantifier la résilience. Par ailleurs, la mise en oeuvre d'une solution de remédiation induit des coûts supplémentaires non prévu. Ces coûts comprennent le coût d'achat des composants, le coût de la main d'oeuvre, le coût des temps d'arrêt, le coût de re-conception, de re-qualification, etc. Nous définissons C comme le coût total de la mise en oeuvre de la remédiation. Il représente le troisième critère.

Pour assurer la résilience à l'obsolescence, les deux axes sont essentiels. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre l'efficacité et l'efficience d'une stratégie de gestion de l'obsolescence. En effet, on ne peut pas appliquer une solution qui soit suffisamment économique mais qui n'offre pas les niveaux de performance attendus du système. De même, on ne peut pas adopter une solution qui offre un taux de rendement au moins équivalent au précédent pour une coût soutenable. Ainsi, nous définissons un vecteur qui représentera le niveau de résilience à l'obsolescence Π_j pour chaque solution j , qui contient les trois critères :

$$\Pi_j = \begin{pmatrix} E_j \\ T_j \\ C_j \end{pmatrix}$$

Évidemment, réussir à assigner un vecteur Π_j pour chaque solution j ne suffit pas pour identifier la solution la plus appropriée. Une méthode d'analyse multicritère s'impose pour surclasser une solution par rapport à toutes les autres.

La quantification de la résilience s'opère alors sur les trois critères : E , T , C . Pour l'efficacité E , nous avons développé une méthodologie d'ingénierie système où l'architecture d'un système soumis au risque d'obsolescence sera le point de départ et pour lequel des étapes de transformation, notamment via les réseaux bayésiens, permettront de définir un niveau de conformité des performances attendues de la solution de remédiation par rapport aux objectifs prévus (l'efficacité). Cette méthodologie est présentée au chapitre 5. Quant aux deux autres critères de l'étude de résilience à l'obsolescence, T et C , l'avis d'experts est utilisé pour les évaluer.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'étymologie du mot résilience a été déterminée avec une étude détaillée de la littérature sur sa définition et son utilisation dans différents domaines. La différence entre obsolescence et robustesse a également été distinguée avec une justification de l'utilisation du mot résilience dans l'étude de l'obsolescence. La quantification et la détermination de la résilience à l'obsolescence sont basées sur l'étude de l'efficacité et de l'efficacité des stratégies de remédiation. Dans la suite de ce travail, nous nous concentrerons sur la détermination de l'efficacité. Le chapitre suivant présente donc les concepts et les outils utilisés à cette fin et qui seront implémentés dans le dernier chapitre consacré à l'étude de cas.

Chapitre 5

La méthodologie ORByC

5.1 Introduction

Un élément obsolète peut continuer à accomplir sa mission tant qu’il reste opérationnel. L’inopérabilité intervient lors de la conjonction de deux statuts : obsolète et défaillant. Autrement-dit, lorsqu’un élément est obsolète et face au risque de défaillance naturel, cet élément devient ”faillible”. L’occurrence d’une défaillance le rendra durablement voire définitivement non réparable et, de faite, indisponible. Par exemple, dès que l’arrêt du S.A.V. (le service après vente) de Windows 7 par Microsoft® a été annoncé (<https://bit.ly/2KHywim>), tout équipement informatique fonctionnant sous ce système d’exploitation est devenu faillible. Le support du fournisseur devenant inexistant, toutes les applications actives sur ce type d’équipement susceptible de s’interrompre dès la première faille, contamination virale ou atout autre dysfonctionnement. L’équipement entre ainsi dans un état de dysfonctionnement définitif.

Du point de vue de la sûreté de fonctionnement, l’obsolescence produit un passage d’un temps de réparation fini (défaillance sans obsolescence) à un temps infini (défaillance avec obsolescence).

La méthodologie ORByC du présent chapitre comporte trois étapes (voir la Figure 5.1). Dans une première étape, l’architecture du système est modélisée à l’aide de la méthodologie ARCADIA. Des modèles de dépendances sont ensuite extraits de ces architectures. Ces modèles sont transcrits en des RBs. La deuxième étape d’ORByC consiste à exploiter l’inférence bayésienne ainsi constituée pour simuler ces RBs en ayant préalablement défini des indicateurs de performance ainsi que des scénarios d’obsolescence. L’analyse des résultats de ces simulations permet de proposer des recommandations pour une conception résiliente dans la dernière étape de la méthodologie ORByC. Techniquement, la transformation des modèles ARCADIA en graphe probabiliste passe par des matrices intermédiaires (DSM et DMM). Cette méthode est particulièrement appropriée aux systèmes complexes puisqu’elle se base sur des graphiques probabilistes. Elle permet d’aider les concepteurs à étudier l’impact des changements sur l’architecture des produits et à réaliser des simulations de scénarios de pronostic (si les probabilités d’un nœud parent sont modifiées) et de diagnostic (si les probabilités d’un enfant sont modifiées) pour évaluer les risques et les coûts de chaque choix de (re-)conception d’un système.

Les sections suivantes présenteront chacune des étapes de la méthodologie ORByC pour s’enchaîner à dernier chapitre où elle sera déployée sur un cas d’étude.

5.2 Concepts de base de la modélisation de l’architecture

Dans ce qui suit, les composants, les fonctions et les fonctionnalités sont désignés par le terme générique ”**Entité**”, noté E . A titre d’exemple, la fonction F : *Tension-Transformation* est exécutée par le composant C : *Transformateur*. Une fonctionnalité pourrait ici être ”offrir une tension de sortie adéquate”. Cela peut se faire par l’exécution de deux fonctions : $F1$:

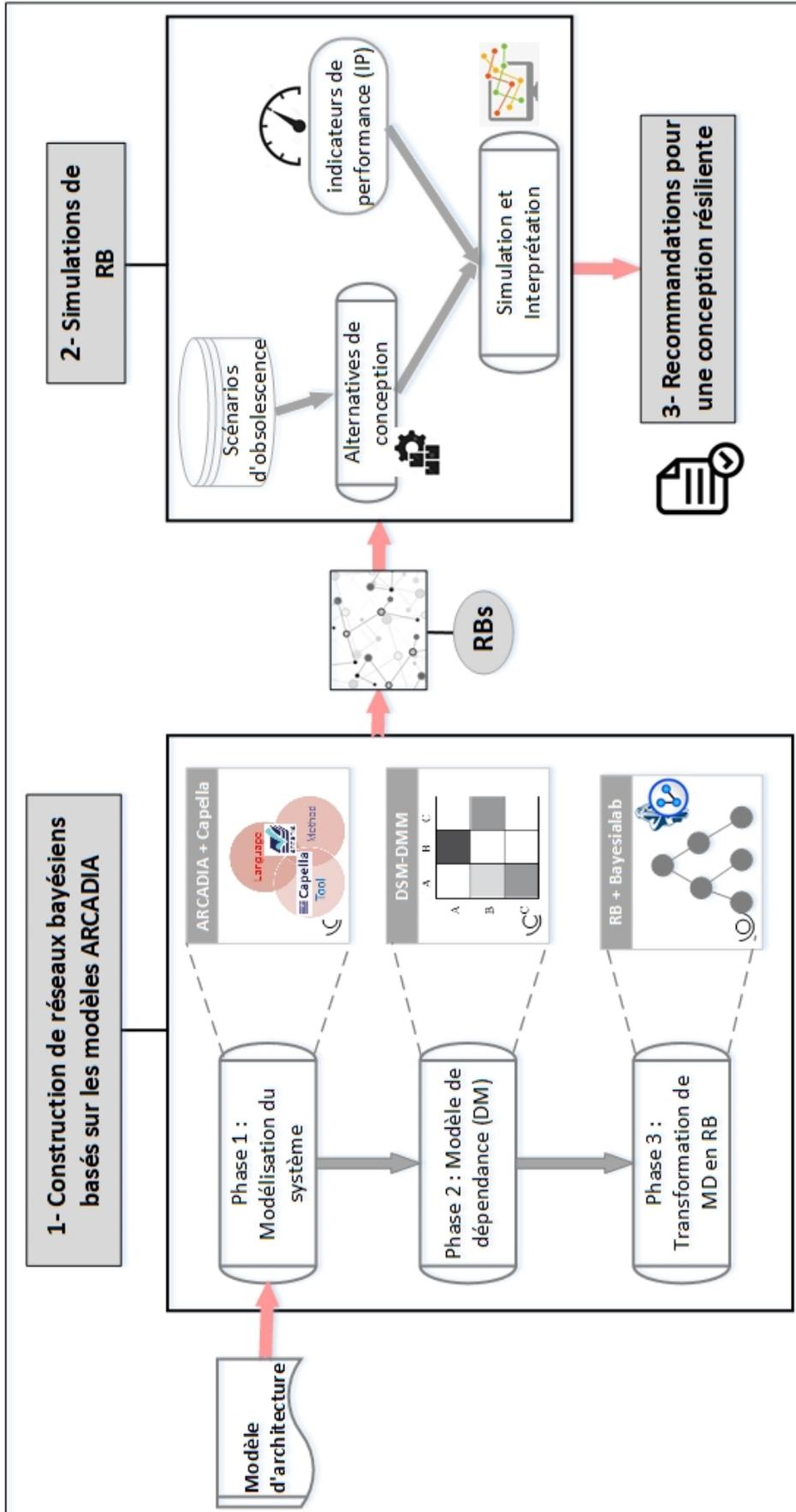


FIGURE 5.1 – La méthodologie ORBYC

Transformation de la tension, suivi par *F2 : Stabilisation de la sortie*. Chaque entité est définie grâce à un ou plusieurs **Attributs**, A . Par exemple, l'entité composant C : *Transformateur* peut être définie, entre autres, par son poids et ses dimensions. La fonction de l'entité est définie par certains attributs associés appelés **Performances** (par exemple, tolérance de tension d'entrée ou chaleur dégagée). La fonctionnalité de l'entité peut également être définie par ses performances, telles que le taux de service. Les attributs sont continus (kilogrammes, mm, etc.) ou discrets (petits, moyens, etc.). Les données continues sont ici transformées en données discrètes (par exemple par intervalle) pour nous permettre de ne recourir qu'aux réseaux bayésiens discrets. Les valeurs admises des attributs sont appelées **Modalités** et notées M . Les intervalles $[2.3v, 4v[$ et $[4v, 6v]$ sont les deux modalités de la tension de sortie du bloc transformateur. La toute première étape de la méthodologie ORByC consiste à modéliser l'architecture d'un système. Une représentation de l'architecture a été proposée sur la base d'une Entité, d'un Attribut et d'une Modalité, (E, A, M) .



FIGURE 5.2 – le modèle Entité-Attribut-Modalité de l'architecture

5.3 Première étape ORByC : construction d'un réseau bayésien

Cette étape permet la constitution d'un réseau bayésien qui caractérise l'architecture du système étudié. Elle se compose de trois phases, comme le montre la Figure. 5.1. La première phase consiste à modéliser le système à l'aide d'ARCADIA. À partir des modèles obtenus des différents niveaux de granularité (Figure. 2.6), les matrices de dépendances sont extraites en phase 2. Elles résument les dépendances et sont utilisées comme entrées pour la construction des réseaux bayésiens. De ces matrices est construite la structure graphique du réseau bayésien en phase 3. Il sera alors impératif de procéder au remplissage des TPCs en mentionnant les techniques d'estimation de ces probabilités. À la fin, une liste de validation doit être faite sur les réseaux ainsi construits. Ces trois phases sont détaillées ci-après.

5.3.1 Phase 1 : Modélisation du système

La toute première phase est la modélisation du système, basée sur les spécifications et respectant les exigences et les contraintes définies. L'ensemble de la méthodologie repose sur l'architecture physique du système (quatrième niveau d'ARCADIA) en raison de son caractère complet. Dans cette étape, nous déterminons les entités qui constituent un système (fonctions,

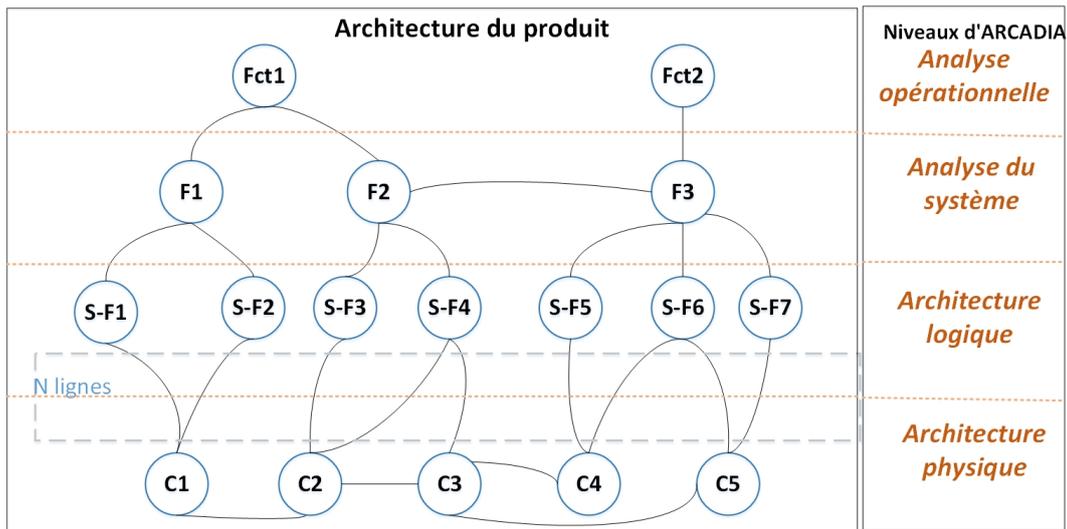


FIGURE 5.3 – Architecture du produit par ARCADIA

composants, fonctionnalités) et les dépendances entre elles (les relations entre les fonctions, les relations entre les composants et les relations entre les fonctions et les composants). Dans la terminologie ARCADIA, les fonctionnalités sont les capacités opérationnelles. Pour réaliser cette modélisation, les fonctions sont définies dans la phase d'analyse opérationnelle. Pour connaître les fonctions du système, elles sont spécifiées dans le niveau d'analyse du système. Afin de diviser le système en sous-systèmes, le troisième niveau d'ARCADIA est utilisé comme architecture logique. Enfin, la cartographie des fonctions et des composants physiques définit l'architecture physique comme la montre la Figure. 5.3. Selon le modèle Entité-Attribut-Modalité proposé dans la section précédente, le processus de modélisation est organisé de la manière suivante :

1. **Modélisation des entités.** Via ARCADIA, la vue générique des entités du système est fournie par le diagramme de l'architecture physique, voir la Figure. 5.4. Les rectangles jaunes représentent les composants des nœuds qui contiennent les composants de comportement (en bleu) qui exécutent les fonctions (en vert). Ce modèle contient des liens entre les entités. Les flèches en vert montrent l'échange entre les fonctions. Les échanges de composants de comportement et de composants des nœuds sont représentés respectivement par des flèches bleues et rouges, voir la Figure. 5.4.
2. **Modélisation des attributs et leurs modalités.** Afin d'identifier les attributs des entités du système, ARCADIA utilise le diagramme de classes Capella, accessible à chaque niveau d'ARCADIA. Les diagrammes de classes permettent d'attribuer des valeurs aux attributs, de sorte que le couple Attribut-Modalité est défini à l'aide de ce modèle de classe. "Le diagramme de classe Capella est fortement inspiré du diagramme de classe UML. Plusieurs concepts UML identiques sont d'ailleurs présents : Classe, Énumération, Type, Propriété, Association, Agrégation, Composition, Généralisation, Paquet, etc. Toutefois, des concepts plus spécifiques sont également présents afin de

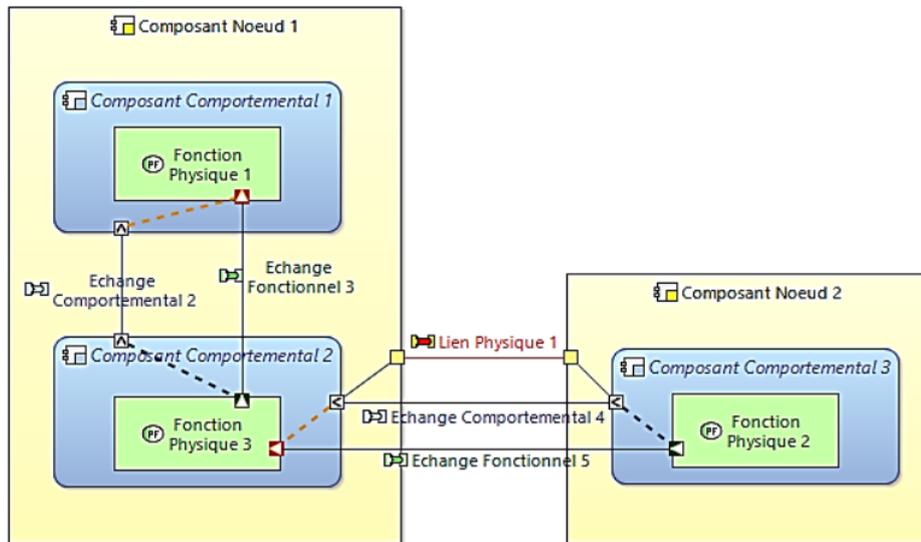


FIGURE 5.4 – Modélisation des entités par ARCADIA : Architecture physique

modéliser le modèle de communication, notamment les éléments d'échange. ” (Roques, 2017).

5.3.2 Phase 2 : Modèle de dépendance (MD)

Cette phase consiste à extraire les dépendances indiquées dans l'architecture physique par des flèches et à les rassembler dans une matrice de dépendances contenant DSM, DMM et MDM. L'extraction des matrices de dépendances des modèles ARCADIA est effectuée manuellement. S'il existe une relation de dépendance entre ces différentes entités (FF , CC ou CF), la cellule matricielle est remplie par "1".

Toutefois, les données de liaison dans ces matrices sont différentes les unes des autres, car à chaque niveau de la méthodologie ARCADIA, le système est modélisé selon une perspective donnée. Au premier niveau, la matrice fournit les liens entre les acteurs/entités externes. Il s'agit d'une macro-représentation de l'environnement du système. Elle donne le DSM_{op} qui relie les acteurs externes et le DMM_{op} qui décrit les interactions à travers leurs fonctions. Dans la deuxième étape, le système et ses fonctions sont décrits. Nous avons donc le DSM_{sys} qui relie les fonctions internes et le DMM_{sys} qui montre les liens du système avec son environnement. Au troisième niveau : l'architecture logique où le système est subdivisé en plusieurs sous-systèmes. Le DMM_{log} fixe "qui fait quoi" dans l'analyse logique du système. Pour l'architecture physique, la création de l'architecture finale se fait en définissant les composants physiques des nœuds qui contiennent les composants physiques des comportements, c'est-à-dire DMM_{nodp} . DMM_{phy} modélise les fonctions physiques des composants ; "qui fait quoi à l'intérieur du système". La dernière étape est l'association de l'élément de configuration avec les différents composants du système, DMM_{config} .

5.3.3 Phase 3 : Transformation de MD en réseau bayésien (RB)

Dans la troisième phase, le modèle (matrice) des dépendances est transformé en un réseau bayésien grâce aux règles que nous avons créées. Ainsi, chaque entité (composant ou fonction) est transformée en un nœud et les dépendances sont traduites en des arcs orientés. On applique également des règles de transformation qui sont des règles de passage des éléments d'ARCAIDA aux réseaux bayésiens. De la sorte, chaque élément du modèle ARCADIA est représenté par une structure de réseau bayésien.

Pour des raisons de compacité, nous avons fait le choix de décrire ces règles par le tableau de Figure. 5.5 permettant ainsi il a répétabilité de cette phase. Ce tableau décrit les règles de transformation pour chacun des 4 niveaux ARCADIA avec, à la fois, la description de l'élément de structure du graphe et les modalités éventuellement associées.

5.3.4 Paramétrage et vérification du RB

Obtenir les probabilités marginales et conditionnelles

L'estimation des probabilités conditionnelles et marginales est nécessaire pour renseigner les tableaux de probabilités conditionnelles (TPC) et ainsi obtenir un réseau bayésien qui reproduit le comportement du système dans les limites des éléments modélisés. C'est une étape cruciale et fastidieuse de l'approche bayésienne. Deux types d'informations peuvent alors être utilisés. Il y a celui des données historiques desquelles des probabilités conditionnelles entre deux entités, e.g. la probabilité qu'il y ait eu arrêt de la fonction F1 sachant la défaillance du composant C2. Il y a aussi les connaissances expertes qui permet de renseigner directement les TPC.

(a) *Données historiques.* Les données peuvent être utilisées pour établir la fréquence d'occurrence des modalités des nœuds parents ainsi que la fréquence d'occurrence des modalités du nœud enfant. Lorsque les données historiques ne sont pas disponibles (comme dans le cas des nouveaux systèmes), nous essayons de trouver des produits similaires en utilisant l'analyse de similarité. La mesure de similarité quantifie le degré de similarité entre deux objets (Ortal und Edahiro, 2020). Elle est utilisée pour établir la ressemblance entre deux échantillons isolés (Iglesias und Kastner, 2013). En termes de conception de produits, "similaire", représente un large éventail de niveaux potentiels de similarité sur le spectre entre "commun" (identique dans la forme, l'ajustement et la fonction) et "unique" (numéros de pièces différents) (Boas, 2008). Plusieurs méthodes ont été utilisées pour mesurer la similarité, telles que la distance euclidienne, la distance Jaccard, la similarité cosinus, la distance de Minkowski et la distance de Hamming (Gomaa u. a., 2013).

(b) *Avis d'experts.* Si aucun produit similaire n'est identifié, les probabilités sont définies par l'interview des experts du système qui sont amenés à répondre à des questions telles que : Quelle est la probabilité d'avoir la modalité a du nœud enfant A , sachant que ses parents

ARCADIA niveaux	Les entités d'ARCADIS niveaux	Règles	Réseau bayésien (BN)		Modalités pour les nœuds / CPT (table de probabilité conditionnelle) pour les arcs.																
			Structure (nœud/arc)	Description de la structure (ordinaire, orpheline, sans enfant)																	
1- Analyse opérationnelle	Acteurs/entités opérationnelles	R1.1 : "Chaque acteur ou entité opérationnelle est représentée par un nœud"		Nœud ordinaire	-Activé / Désactivé																
	Activité opérationnelle	R1.2 : "Chaque activité opérationnelle est représentée par un nœud"		Nœud ordinaire	-Faisable/ Non faisable -Obsolète /Not obsolete, -Activé / Désactivé...																
	Opérationnel Acteurs/Entités et échange d'activités opérationnelles	R1.4 : " Si un acteur/entités opérationnel(le)s a exécuté une activité opérationnelle, alors faites ce qui suit R1.1 pour les Acteurs/Entités et R1.2 pour l'Activité Opérationnelle et créer un arc depuis les Acteurs/Entités Opérationnels vers l'Activité Opérationnelle "		La fonction est un enfant et Acteur/Entité est un parent. +sens de l'arc unidirectionnel de l'Acteur/entité à la Fonction	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Activité opérationnelle</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Opérationnel Acteurs/Entités</td> <td>Activé</td> <td>100 %</td> <td>0 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Désactivé</td> <td>0 %</td> <td>100 %</td> </tr> </table>			Activité opérationnelle				Faisable	Non Faisable	Opérationnel Acteurs/Entités	Activé	100 %	0 %		Désactivé	0 %	100 %
			Activité opérationnelle																		
		Faisable	Non Faisable																		
Opérationnel Acteurs/Entités	Activé	100 %	0 %																		
	Désactivé	0 %	100 %																		
Opérationnel Interaction	R1.3 : "S'il existe une corrélation, une dépendance, ou respectivement, entre/depuis une activité opérationnelle i et une activité opérationnelle j, alors faites R1.2 pour i et R1.2 pour j et créez un arc de i à j."		j est un nœud enfant et i a un nœud parent +sens arc unidirectionnel de i à j	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Activité opérationnelle j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Opérationnel Activité i</td> <td>Obsolète</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Non Obsolète</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Activité opérationnelle j				Faisable	Non Faisable	Opérationnel Activité i	Obsolète	(1-X)%	X %		Non Obsolète	Y %	(1-Y) %	
		Activité opérationnelle j																			
		Faisable	Non Faisable																		
Opérationnel Activité i	Obsolète	(1-X)%	X %																		
	Non Obsolète	Y %	(1-Y) %																		
2- Analyse du système	Fonction du système	R2.1 : "Chaque fonction du système est représentée par un nœud"		Nœud ordinaire	-Faisable/ non faisable -Obsolète /Not obsolete, -Réquis /Non requis...																
	Fonctionnel Échange de systèmes	R2.2 : " S'il y a corrélation, dépendance ou respectivement entre une fonction du système i et une fonction du système j, alors faites R2.1 pour i et R2.1 pour j et créez un arc de i à j".		i est un nœud enfant et j est un nœud parent +sens arc unidirectionnel de j à i	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Fonction du système j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Fonction du système i</td> <td>Faisable</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Non Faisable</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Fonction du système j				Faisable	Non Faisable	Fonction du système i	Faisable	(1-X)%	X %		Non Faisable	Y %	(1-Y) %
		Fonction du système j																			
		Faisable	Non Faisable																		
Fonction du système i	Faisable	(1-X)%	X %																		
	Non Faisable	Y %	(1-Y) %																		
3-Logical Architecture	Composant logique	R3.1 : "Chaque composant logique est représenté par un nœud"		Nœud ordinaire	Obsolète /Non obsolète, -Obligatoire /Non obligatoire,																
	Fonction logique	R3.2 : "Chaque fonction du système est représentée par un nœud"		Nœud ordinaire	-Faisable/ non faisable -Obsolète /Not obsolete, -Réquis /Non requis...																
	Échange de composants logiques et de fonctions logiques	R3.3 : "Si un composant logique a exécuté une fonction logique, alors faire R3.1 pour le composant logique et R3.2 pour la fonction logique et créer un arc du composant logique à la fonction logique".		-La fonction logique est un nœud enfant et le composant logique est le parent. +sens de l'arc unidirectionnel de la composante logique à la fonction logique	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Fonction logique</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Composant logique</td> <td>Activé</td> <td>100 %</td> <td>0 %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Désactivé</td> <td>0 %</td> <td>100 %</td> </tr> </table>			Fonction logique				Faisable	Non Faisable	Composant logique	Activé	100 %	0 %		Désactivé	0 %	100 %
			Fonction logique																		
			Faisable	Non Faisable																	
	Composant logique	Activé	100 %	0 %																	
	Désactivé	0 %	100 %																		
Logique Échange de composants	R3.4 : " S'il existe une relation entre deux composants logiques i et j, alors faire R3.1 pour A et R3.1 pour B et créer un arc de j à i"		i est un nœud enfant et j est un nœud parent +sens arc unidirectionnel de j à i	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Composant logique j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non faisable</td> </tr> <tr> <td>Composant logique i</td> <td>Activé</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Désactivé</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Composant logique j				Faisable	Non faisable	Composant logique i	Activé	(1-X)%	X %		Désactivé	Y %	(1-Y) %	
		Composant logique j																			
		Faisable	Non faisable																		
Composant logique i	Activé	(1-X)%	X %																		
	Désactivé	Y %	(1-Y) %																		
Logique Échange de fonctions	R3.5 : " S'il y a corrélation, dépendance ou respectivement entre une fonction logique i et une fonction logique j, alors faites R3.2 pour i et R3.2 pour j et créez un arc de i à j".		i est un nœud enfant et j est un nœud parent +sens arc unidirectionnel de j à i	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Fonction logique j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Fonction logique i</td> <td>Faisable</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Non Faisable</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Fonction logique j				Faisable	Non Faisable	Fonction logique i	Faisable	(1-X)%	X %		Non Faisable	Y %	(1-Y) %	
		Fonction logique j																			
		Faisable	Non Faisable																		
Fonction logique i	Faisable	(1-X)%	X %																		
	Non Faisable	Y %	(1-Y) %																		
4-Physical Architecture	Composant physique	R4.1 : " Chaque composant physique est représenté par un nœud"		Nœud ordinaire	-Activé / Désactivé - Obsolète /Non obsolète....																
	Fonction physique	R4.3 : "Chaque fonction physique est représentée par un nœud"		Nœud ordinaire	-Faisable/ Non faisable -Obsolète /Not obsolete, -Réquis /Non requis...																
	Physique Échange de composants	R4.5 : "S'il existe une relation entre deux composantes physiques i et j, alors faire R4.1 pour i et R4.1 pour j et créer un arc de j à i		i est un nœud enfant et j est un nœud parent +sens arc unidirectionnel de j à i	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Composant physique j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Activé</td> <td>Désactivé</td> </tr> <tr> <td>Composant physique i</td> <td>Activé</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Désactivé</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Composant physique j				Activé	Désactivé	Composant physique i	Activé	(1-X)%	X %		Désactivé	Y %	(1-Y) %
			Composant physique j																		
		Activé	Désactivé																		
Composant physique i	Activé	(1-X)%	X %																		
	Désactivé	Y %	(1-Y) %																		
Physique Échange de fonctions	R4.6 : "S'il existe une corrélation, une dépendance ou, respectivement, entre/depuis une fonction physique i et/vers une fonction physique j, alors faites R4.3 pour i et R4.3 pour j . Créer un arc de j à i "		i est un nœud enfant et j est un nœud parent +sens arc unidirectionnel de j à i	<table border="1"> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Fonction physique j</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td>Faisable</td> <td>Non Faisable</td> </tr> <tr> <td>Fonction physique i</td> <td>Faisable</td> <td>(1-X)%</td> <td>X %</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Non Faisable</td> <td>Y %</td> <td>(1-Y) %</td> </tr> </table> <p>X et Y sont des nombres réels</p>			Fonction physique j				Faisable	Non Faisable	Fonction physique i	Faisable	(1-X)%	X %		Non Faisable	Y %	(1-Y) %	
		Fonction physique j																			
		Faisable	Non Faisable																		
Fonction physique i	Faisable	(1-X)%	X %																		
	Non Faisable	Y %	(1-Y) %																		

FIGURE 5.5 – les règles de transformation pour les entités

B et C sont respectivement à b et c ? Dans ce cas, tous les nœuds A , B et C ont très souvent deux modalités exclusives : $a, \neg a, b, \neg b$ et $c, \neg c$. Ainsi, les réseaux bayésiens sont créés par l'élicitation d'experts (dans laquelle on demande à des experts de créer un modèle de systèmes complexes en donnant leur avis sur la structure et les probabilités conditionnelles). Ces modèles doivent être validés pour tester leur capacité à décrire le système. Parmi les cadres qui existent pour assurer la validation de l'élicitation d'experts, [Cronbach und Meehl \(1955\)](#) suggèrent la psychométrie (tentatives de mesurer des variables latentes, non observées, "vraies" comme l'intelligence). [Pitchforth und Mengersen \(2013\)](#) proposent un cadre de test de validité. [Pollino u. a. \(2007\)](#) proposent des méthodes pour tester la validité prédictive des réseaux élaborés par des experts en se référant aux concepts de "sensibilité aux paramètres" et de "sensibilité aux résultats". Les travaux de recherche de [Kemp-Benedict \(2008\)](#); [Mkrtychyan u. a. \(2016\)](#); [Kechaou u. a. \(2020\)](#); [Apedome u. a. \(2011\)](#) illustrent également le processus d'élicitation des réseaux bayésiens. Une démarche d'élicitation complète et récente est présentée sur le sujet dans les travaux de recherche de [Kechaou \(2020\)](#).

Vérification du RB construit

Le travail d'élicitation précédent permet d'avoir une structure bayésienne qu'il faudrait vérifier. Comme un RB est un graphique acyclique, il est important de s'assurer qu'il n'y a pas de cycles dans le réseau. Pour cette vérification, il est recommandé d'utiliser un logiciel dédié comme Gephi qui permet notamment de déterminer si un graphique a des cycles (e.g. $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$). Si c'est le cas, il faut les éliminer en supprimant l'un des arcs qui crée le cycle. Cela peut se faire sur la base d'une analyse du comportement du système, du champ d'étude décidé et des objectifs associés. Enfin, cela est étroitement dépendant de la sémantique des liens de dépendance identifiés.

Dans l'exemple de la Figure. 5.6, ce point est illustré. Le système contient un support de capteur, un ventilateur et une carte de contrôle. Il y a deux capteurs pour l'humidité, le capteur-H, et la température, le capteur-T. Chacun de ces deux composants a 3 modalités : haute, nominale et basse. La vitesse de rotation du ventilateur a deux modalités : haute et basse. Sur la base des informations envoyées par le capteur-T, la carte de contrôle commande la vitesse du ventilateur pour abaisser la température du système, si nécessaire. Le processus fonctionne comme suit. Lorsque le Capteur-T := *élevé*, la carte de contrôle envoie des signaux pour changer la modalité de vitesse de basse à haute, c'est-à-dire Vitesse := *élevée*. L'augmentation du débit d'air fait baisser la température. La température plus basse est alors détectée par le capteur-T := *bas* qui fait revenir la vitesse du ventilateur en mode bas, c'est-à-dire Vitesse := *bas*. Cette analyse montre que la baisse de température due à la vitesse élevée du ventilateur est un phénomène qui implique un paramètre exogène au système qui n'est pas explicitement modélisé. Il n'est donc pas nécessaire de modéliser cette relation entre la vitesse et la température par un arc dans le réseau bayésien (voir la Figure. 5.6). Cela permet d'éliminer un cycle potentiel dans le réseau bayésien sans en altérer la sémantique et la

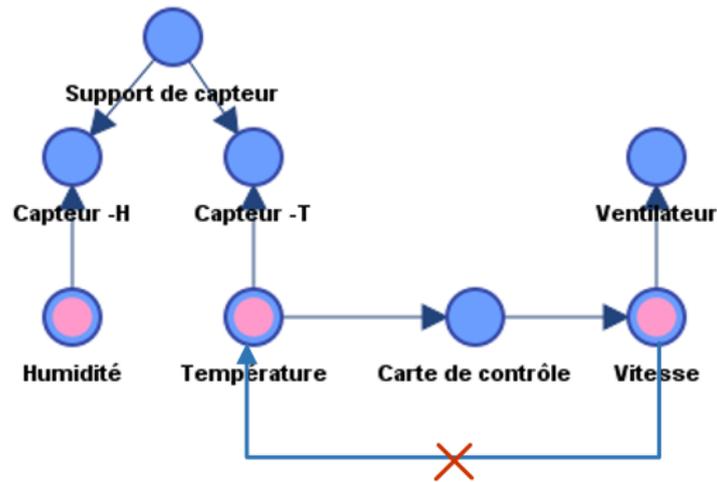


FIGURE 5.6 – Pas de cycle

représentativité du comportement du sous-système. D'autre part, la raison pour laquelle cet arc peut être ignoré est que les phénomènes ne sont pas simultanés ; le refroidissement se produit à la suite de l'augmentation du débit d'air. Il s'agit, en l'occurrence, d'un arc temporel.

5.4 Deuxième étape d'ORByC : Simulations de RB pour étudier la résilience à l'obsolescence :

L'entrée de la deuxième étape de la méthodologie ORByC est un réseau bayésien de base dans lequel les scénarios d'obsolescence seront appliqués, voir figure. 5.1. L'étape la plus importante est la génération de scénarios d'obsolescence. Un scénario se compose de deux éléments : un candidat (fonction ou composant) qui peut être affecté par l'obsolescence et sa liste d'alternatives possibles. Afin de générer des scénarios, deux étapes sont nécessaires :

5.4.1 Élaboration de scénarios d'obsolescence et génération d'alternatives

Il n'est pas nécessaire d'étudier tous les composants et fonctions d'un système. Ceux dont la durée de vie est nettement supérieure à celle du système sont écartés. Par exemple, l'obsolescence de l'utilisation de l'acier dans la carrosserie d'un véhicule dont le cycle de vie commercial dépasse les décennies ne sera pas considérée dans un système qui n'a pas vocation à atteindre une telle durée de vie.

Dans un premier temps, il est essentiel de détecter le ou les candidats les plus susceptibles d'être obsolètes. Pour ce faire, la première action consiste à organiser une séance de brainstorming entre les experts et les parties prenantes du système. Le brainstorming peut être individuel ou en groupe . Il existe deux types de brainstorming de groupe. Le premier type est un brainstorming structuré durant lequel les membres du groupe sont autour d'une table et apportent chacun des idées à tour de rôle selon un ordre pré-déterminé que l'on impose. Il peut

être question par exemple de traiter par ordre de gravité les risques d’obsolescences redoutés comme il peut être question de traiter systématiquement chacun des constituants du système. Le deuxième type autorise des échanges et un débat à bâton rompu pour éviter de se focaliser sur un problème d’obsolescence plutôt qu’un autre. Dans le cas d’étude présenté au chapitre suivant, nous avons adopté la forme structurée du brainstorming de groupe composé des avis ou des documents techniques émanant : d’experts du système, de concepteurs du système, de parties prenantes, d’utilisateur du système et de ceux qui réalisent l’étude d’obsolescence.

La sélection des éléments critiques à risque d’obsolescence repose sur plusieurs critères. Le premier est l’occurrence avérée d’une notification de discontinuité de produit (NDP). Il s’agit d’une information envoyée par le fournisseur d’un constituant du système et qui exprime sa décision d’arrêter la fabrication de ce produit. Lorsque tous les cas de NDP sont traités ou en l’absence de ceux-ci, une étude d’analyse du risque d’obsolescence est réalisée. Il s’agit du deuxième critère. Dans ce cadre, peu de travaux existent dans la littérature sur l’estimation du risque d’obsolescence pour permettre un classement des priorités. [Trabelsi u. a. \(2020\)](#) a développé, dans ce sens, une méthode de calcul du ”degré d’obsolescence (DO)”. Cette méthode est basée sur un modèle statistique s’appuyant sur le modèle de Weibull. Le calcul du DO permet de répertorier les composants du système par ordre de sensibilité à l’obsolescence. Le travail de [Zolghadri u. a. \(2020\)](#) vise à déterminer quels éléments de l’architecture du système peuvent être sensibles à un événement d’obsolescence. Ce travail complète le précédent et permet d’obtenir un ordonnancement des risques d’obsolescence à traiter dans un système d’étude.

Pour chaque composant ou fonction désigné effectivement ou potentiellement obsoléscent, il faut trouver ses alternatives possibles. Plusieurs remédiations possibles peuvent être viables. Par exemple, pour un PC ordinaire, il y a probablement des centaines de composants dans le système. Il existe probablement de nombreux composants de remplacement sur le marché (voir par exemple <https://pcpartpicker.com/list/>). Un brainstorming structuré entre le même groupe doit être effectué afin de choisir les solutions les plus appropriées. Dans la structure des réseaux bayésiens, il est difficile de gérer des réseaux qui contiennent de très nombreuses alternatives. En effet, un nœud qui possède de nombreux arcs entrants génère une table de probabilité conditionnelle avec un accroissement factoriel. Il faut être alors mesuré dans le choix des alternatives à l’obsolescence qu’il faut envisager pour faire barrière à l’occurrence de l’obsolescence. Nous conseillons fortement de ne pas dépasser les trois alternatives. Le choix de ces alternatives est basé sur une étude de marché : la disponibilité du composant, la flexibilité de son approvisionnement, le coût du changement, etc.

À ce stade, nous disposons d’un scénario complet : l’élément candidat de l’architecture et ses alternatives. Après l’étude de la faisabilité de chaque alternative de conception, la modélisation des scénarios d’obsolescence avec leurs alternatives au sein des réseaux bayésiens

peut s'opérer. Sur la base du modèle d'architecture proposé dans la Figure 5.3, les différents changements d'obsolescence possibles sur l'architecture sont identifiés. L'obsolescence affecte tous les éléments de l'architecture sous plusieurs formes. Un changement sur un élément de l'architecture peut être sa suppression, son ajout ou son remplacement.

5.4.2 Système d'indicateurs de performance (SIP)

A la section 4.4, nous avons expliqué l'utilité et la façon dont pourrait être évaluée la résilience à l'obsolescence d'un système. Cela repose sur trois critères : l'efficacité E dans l'atteinte des performances attendues du système après avoir implémenté la solution de remédiation à l'obsolescence, le coût C de mise en oeuvre de cette solution et enfin le délai vraisemblable T nécessaire. Ces critères constitue le vecteur \prod_j qui est tout simplement l'indicateur de performance clé quant à la résilience à l'obsolescence d'une architecture système face à une solution implémentée j . Évidemment, celle-ci peut représenter une remédiation comme tout une combinaison de remédiation au sein de l'architecture système. Pour évaluer ce vecteur, nous avons postulé que la source la plus fiable pour évaluer le coût et le délai d'implémentation d'un remédiation, compte-tenu du niveau de maturité des pratiques de remédiation à l'obsolescence en entreprise, serait celle estimée par l'expertise. Dans ce sens, nous préconisons alors simplement d'attribuer un coût et un délai de changement à chaque modification opérée dans la structure bayésienne pour en déterminer le coût global et le délai total d'une solution. Pour ce qui est de l'efficacité, nous proposons la notion de réalisabilité (traduit par feasibility) qui traduit la capacité d'une entité de l'architecture du système à répondre aux exigences associées requises. Il est évalué dans un intervalle de 0% à 100%. Un taux de faisabilité de 0% signifiera que l'exigence ne pourra pas être satisfaite. Un taux est de 100% impliquera l'entière capacité de l'entité à le faire. Attention, il ne s'agit pas de la notion de fiabilité de l'entité (au sens de la sûreté de fonctionnement, voir EN NF 13306) ! Une entité peut être à 100% réalisable tout en étant peu fiable. De manière dual, "la réalisabilité est à la faillibilité¹ ce qu'est la défaillance est à la fiabilité".

5.4.3 Simulation et Interprétation

Il est maintenant nécessaire d'implémenter des scénarios d'occurrence de l'obsolescence et de choix de remédiation pour en déterminer les écarts de performance. L'inférence bayésienne du réseau obtenu de la translation ARCADIA \rightarrow RB permet de propager les changements opérés sur les entités à travers toute l'architecture du système. L'étude des écarts de performance permettront l'évaluation de la résilience d'une telle architecture. Un scénario sera alors représenté par une série d'observations (au sens du raisonnement bayésien relativement aux probabilités conditionnelles – "*evidences*" en anglais) dont nous cherchons à déterminer les

1. Au sens indiqué en introduction du présent chapitre (Section 5.1).

conséquences.

Il existe quatre types d'observations : Exactes, probabilistes, numériques et de vraisemblance (Conrady und Jouffe, 2015). Pour illustrer la différence entre les types d'observations, nous prenons l'exemple de la planification du trafic ferroviaire. Le service de planification modifie l'horaire pour deux raisons. Dans certaines conditions météorologiques, il y a des obstacles sur les voies, comme de la neige, qui empêchent le conducteur de conduire correctement le train. La deuxième raison est l'annulation du trafic, qui est une décision humaine basée sur des causes telles que les grèves et les manifestations. Ainsi, le réseau bayésien comporte 5 nœuds : Conditions météorologiques, Grèves et manifestations, Obstacles sur la voie, Annulation du trafic et Réorganisation du trafic, voir la Figure. 5.7.

observation Exacte. Cela signifie qu'il n'y a "aucune incertitude concernant l'état de la variable (nœud) (Conrady und Jouffe, 2015)". Dans l'exemple, afin d'analyser les changements dans le réseau, nous indiquons que la température est comprise entre 0 °C et 10 °C ($P(0 < T \leq 10) = 100\%$) et qu'il n'y a pas de manifestations ($P(\text{Grèves et manifestations}) = \text{Faux}) = 100\%$) cf. la Figure. 5.7 (a) - barres vertes. Le RB renvoie l'observation qu'il y a très peu de chances (0,1%) de reprogrammer le trafic.

observation probabiliste. Elle est interprétée par Valtorta u. a. (2002) comme une observation d'incertitude et peut être présentée comme une distribution de probabilité d'une ou plusieurs modalités. Elles sont basées sur des informations incertaines qui sont utilisées pour la révision des croyances. La source de cette incertitude peut être soit l'information elle-même (absence de faillibilité de la source de l'information), soit l'incomplétude de l'information dans la description d'une mesure de probabilité de manière partielle (Mrad, 2015). Elles sont caractérisées par des distributions locales de probabilités postérieures qui ne peuvent pas être modifiées par d'autres informations. Dans l'exemple des conditions météorologiques, l'entrée de la distribution de probabilité de l'existence d'obstacles est une observation probabiliste de 95% qu'elle est fautive, cf. Figure. 5.7 (b) - barres turquoise.

Observation numérique. "Au lieu d'une distribution de probabilité spécifique, une observation ou un scénario peut exister sous la forme d'une valeur numérique unique, ce qui signifie que nous devons établir une observation numérique (Conrady und Jouffe, 2015)". Dans ce type d'observation, il n'y a pas de problème d'incertitude mais d'imprécision. En effet, nous avons une valeur attendue dont nous sommes sûrs. Mais nous ne connaissons pas la distribution qui donne cette valeur spécifiée. Dans notre exemple, la valeur attendue de la température est $E(\text{Condition météorologique}) = 15 \text{ °C}$, cf. Figure 5.7 (c). La distribution est évidemment autour de cette valeur, mais elle n'est pas assez précise. Plusieurs lois et méthodes probabilistes permettent de déterminer les distributions qui donnent la même valeur attendue. L'outil que nous utilisons et indiqué dans la section 2.5 (e.i. BayesiaLab) est fourni par ces lois et permet de proposer une distribution (Conrady und Jouffe, 2015) qui induit précisément cette valeur attendue de la condition météorologique.

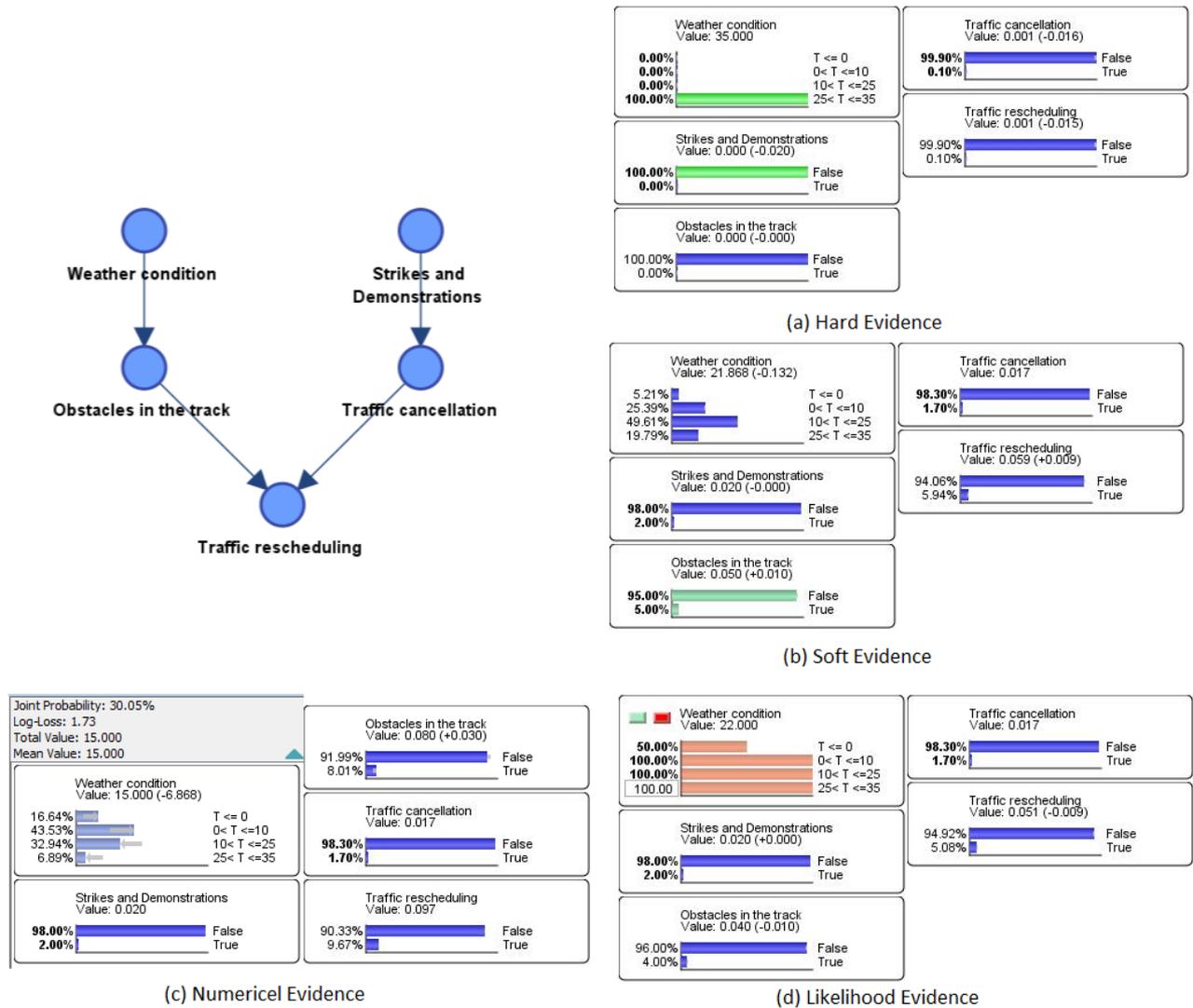


FIGURE 5.7 – Observations exacte et probabiliste

Observation avec vraisemblance. L'observation avec vraisemblance décrit l'incertitude sur l'observation elle-même. Elle nécessite une évaluation de la relation entre la valeur observée et les valeurs réelles possibles (Mrad u. a., 2015). Cela peut représenter, par exemple, la "confiance" que l'on peut accorder au jugement d'un expert météorologue et à celui d'un novice. Ces observations sont représentées par un rapport de vraisemblance et non par une distribution de probabilité (Mrad, 2015). Dans l'exemple de la Figure. 5.7 (d) - barres roses, nous pouvons évaluer la valeur donnée par l'expert. L'information selon laquelle la température est inférieure à 0 °C est jugée proche à 50% de la valeur réelle et les autres à 100%. L'expert nous informe qu'il est "à moitié convaincu" qu'une température inférieure à zéro peut se produire et il est certain qu'une température comprise entre 0°C et 35°C peut se produire.

La distinction entre les observations probabilistes et les observations avec vraisemblance est établie par Valtorta u. a. (2002) et Mrad u. a. (2014). Ils citent deux types de différences. La première concerne la spécification : Pour les observations probabilistes, la distribution est spécifiée "tout bien considéré", tandis que pour les observations avec vraisemblance, le rapport

de vraisemblance est "sans antécédent" (Mrad u. a., 2014). La deuxième différence concerne la propagation : "alors que l'observation probabiliste reste inchangée en actualisant les variables observées, l'observation avec vraisemblance doit être combinée avec une croyance antérieure afin d'actualiser la croyance sur la ou les variables observées", (Mrad u. a., 2014).

En se basant sur ces quatre types d'évidences, deux séries de simulations peuvent être réalisées : **le diagnostic et le pronostic**.

- **La simulation de pronostic** est utilisée pour évaluer l'efficacité et l'effet d'un scénario choisi sur les performances du système. La simulation consiste à générer toutes les combinaisons d'alternatives attendues pour chacun des éléments soumis à l'obsolescence (dans l'horizon temporel considéré). Chaque combinaison sera implémentée dans le RB et ensuite, le niveau de performance d'un nœud cible sera noté. Nous avons choisi, dans notre méthodologie, d'utiliser le taux de réasabilité d'une fonction principale pour mesurer cette performance. Les résultats de la simulation sont alors présentés comme une série de valeurs correspondant à chacune des combinaisons. L'interprétation peut alors se faire par un classement par performance obtenue, de la plus élevée à la plus faible. Un autre classement peut également être effectué pour différencier toutes les combinaisons qui présentent un niveau de performance inférieur à un seuil minimum. Le concepteur du système peut alors associer à chacun de ces classements les coûts et les délais des alternatives pour faire son choix.
- **La simulation de diagnostic** consiste en un raisonnement ascendant ... de l'effet à la cause potentielle. Elle est utilisée pour trouver la combinaison appropriée d'alternatives. En fixant un niveau de performance pour la fonction ou l'élément principal, on observe les taux de probabilité associés aux alternatives envisagées. De cette manière, il est possible d'identifier les alternatives les plus influentes pour atteindre la performance désignée. L'avantage de l'approche bayésienne est qu'il est possible d'interroger le RB avec une précision croissante jusqu'à ce que l'on soit certain de la combinaison d'alternatives qui garantirait la même performance. En d'autres termes, après avoir fixé la performance, on peut simuler les décisions relatives au choix de cette alternative et observer l'évolution des taux de probabilité des alternatives des autres éléments.

5.5 Conclusion

La méthodologie d'ingénierie des systèmes ARCADIA utilise tous les modèles pour pouvoir maintenir le système à jour et pour le valider, La méthodologie ORByC cherche à exploiter les interdépendances identifiées au sein de l'architecture du système de manière à déterminer quels composants, fonctions ou chaînes fonctionnelles pourraient être affectés par l'apparition de l'obsolescence.

Ces nouvelles connaissances permettent au concepteur de déterminer les composants du système les plus sensibles en cas d'obsolescence et de proposer ainsi des solutions résilientes. Cette méthode permet, par ailleurs, de tester puis comprendre les conséquences d'un changement en réponse à l'obsolescence sur l'ensemble de l'architecture et ce, via un formalisme qui permet à la fois, la capitalisation, interrogation en situation d'incertitude et d'évaluation de la performance quant à des exigences qui peuvent évoluer dans le temps. Tout cela est fait en tenant compte des scénarios possibles d'apparition de l'obsolescence. La méthodologie ORByC est ainsi un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les meilleurs scénarios de remédiation de l'obsolescence et de mettre en œuvre les choix de conception possibles à moyen et long terme. Elle est développée pour contribuer aux méthodes stratégiques de remédiation. Elle tient compte des dépendances entre les entités architecturales. La méthodologie cherche à exploiter les interdépendances identifiées au sein de l'architecture du système de manière à déterminer quels composants, fonctions ou chaînes fonctionnelles pourraient être affectés par l'apparition d'une obsolescence.

Chapitre 6

Étude de cas

6.1 Introduction

Le présent chapitre a vocation à expliciter la méthodologie ORByC à travers un cas d'étude réel pris en charge dans des conditions courantes de projet de recherche-action entre des équipes de recherche académiques (notamment le Laboratoire QUARTZ auquel j'appartiens et un consortium d'industriels du Ferroviaire). Il a vocation à démontrer l'applicabilité de la méthodologie ORByC sur des systèmes industriels complexes et permettre sa répétabilité. Nous avons pour cela détaillé les deux étapes de la méthodologie, c'est à dire la construction des RB et la simulation de deux scénarios suivis de l'interprétation qui a permis d'appréhender le risque d'obsolescence et d'évaluer le taux de réalisabilité de l'architecture rehaussée des alternatives d'obsolescence de deux sous-systèmes. Pour des raisons évidentes quant au secteur industriel stratégique qu'est le ferroviaire, le chapitre ne prend pas en compte les deux composantes restantes de l'indicateur de résilience à l'obsolescence que sont les coûts et les délais d'implémentation des alternatives considérées.

6.2 Le système ERTMS – Contexte et cas d'étude

Pour expérimenter et stabiliser la méthodologie ORByC, nous l'avons déployée sur un cas concret dans le cadre d'un projet auquel nous avons été intégrés durant le présent travail. Il s'agit d'un projet portant sur l'étude de la résilience du système européen de gestion du trafic ferroviaire (ERTMS - *European Rail Traffic Management System*). L'ERTMS est un système de gestion du trafic ferroviaire européen lancé par la Commission européenne au début des années quatre-vingt-dix et mis en œuvre par huit membres de l'UNIFE¹ en Europe. Cette initiative vient à la suite de projets pilotes internationaux antérieurs qui visaient à créer une normalisation et uniformisation de la signalisation en cabine (Booth, 2012). Il existe de nombreux obstacles techniques au passage d'une frontière européenne (Granier, 2005). Le plus connu de ces obstacles est l'écartement des rails, pour lequel la Commission européenne recense au moins quatre types d'écartement différents en Europe. Pour favoriser l'interopérabilité au sens de la possibilité de circulation sans entraves des trains sur différents réseaux ferroviaires, d'autres obstacles techniques moins visibles sont à lever, parmi lesquels : la hauteur des quais pour les passagers, les différents types de courant électrique, les pentes maximales, etc.

Pour la signalisation ferroviaire et le contrôle de la vitesse des trains, les difficultés liées à leur diversité ont été réglées au niveau national, c'est-à-dire pour chaque réseau ferroviaire national et indépendamment des autres. La fragmentation qui caractérise le réseau ferroviaire européen (CE, 2006) s'explique par ce manque de normalisation. En effet, elle entraîne des risques de pannes, des coûts supplémentaires et complique la tâche des conducteurs. Cela constitue un handicap pour le développement du transport ferroviaire à l'échelle européenne. À titre d'exemple, le train Thalys, qui circule principalement entre Paris et Bruxelles, doit

1. Union des Industries Ferroviaires Européennes

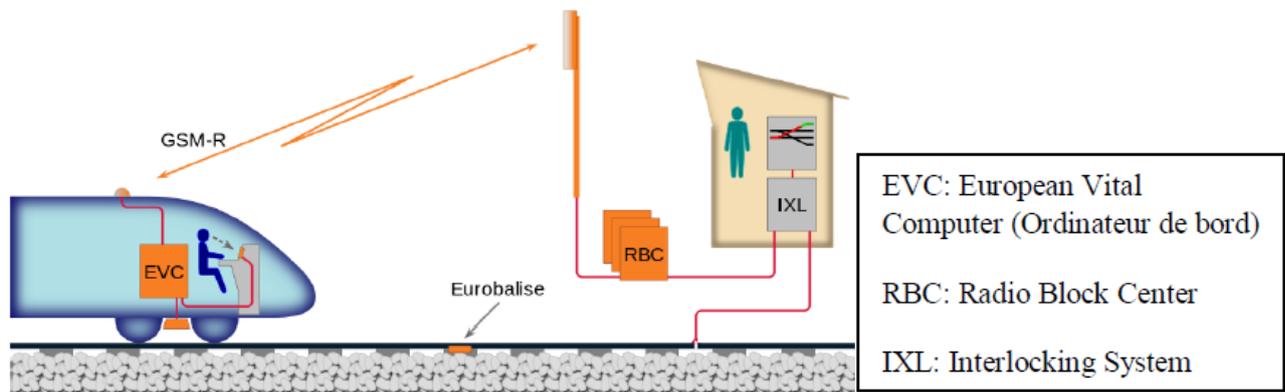


FIGURE 6.1 – Illustration de l'infrastructure ERTMS (Kousri, 2016)

être équipé de sept systèmes différents de signalisation et de contrôle de vitesse pour assurer ce trajet (CE, 2005).

La réalisation de l'ERTMS a permis de remédier à ces obstacles par la standardisation en Europe du système de signalisation et de contrôle ferroviaire (Jabri u. a., 2010). Elle permet d'harmoniser la signalisation ferroviaire en Europe tout en garantissant la sécurité du trafic. Les avantages de cette normalisation seront nombreux (CE, 2005; Jabri u. a., 2010; El Koursi und Kampmann, 2002) :

- Dynamiser le secteur ferroviaire ;
- Augmenter la capacité de l'infrastructure ferroviaire ;
- Favoriser l'intégration, à travers l'Europe, des services ferroviaires de fret et de passagers ;
- Réduire les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance des équipements de signalisation ;
- Promouvoir l'interopérabilité du trafic sur le réseau européen à grande vitesse ;
- Développer la concurrence tout en ouvrant les marchés nationaux.

La Figure. 6.1 représente une illustration de l'infrastructure ERTMS en milieu ferroviaire. L'ERTMS se compose essentiellement de deux sous-systèmes (Barger u. a., 2009) :

- l'ETCS (European Train Control System) constitue le système de contrôle du train, qui communique au conducteur des informations sur la vitesse autorisée et les autorisations de mouvement, et contrôle le respect des indications. La vitesse du train est comparée à la vitesse maximale autorisée par un ordinateur embarqué qui actionne automatiquement les freins en cas de dépassement.
- Le GSM-R (GSM for Railways) est le système de communication radio utilisé pour l'échange d'informations entre le train et le sol. Ce système est basé sur la norme des téléphones cellulaires GSM, mais utilise différentes fréquences spécifiques aux chemins de fer, et quelques fonctions avancées liées à l'application ferroviaire, comme le multicast².

2. Il s'agit d'un système dédié de routage Ethernet dans le ferroviaire

Ce système permet au conducteur de dialoguer avec les centres de contrôle. Deux autres composants (système de sécurité des enclenchements (INESS) et couche européenne de gestion du trafic (ETML)) sont en cours de développement et seront intégrés à l'ERTMS dans un avenir proche.

Dans la section suivante, la méthodologie ORByC est appliquée aux systèmes ERTMS. Une application de la première et de la deuxième étape d'ORByC est ainsi réalisée et détaillée.

6.3 Première étape : construction des réseaux bayésiens ERTMS

6.3.1 Phase 1 : Modélisation du système

Dans cette section, nous allons procéder à une transposition des éléments du contexte de l'ERTMS régional aux concepts d'ARCADIA. Pour chaque niveau d'ARCADIA, des diagrammes de système sont définis.

L'analyse opérationnelle

L'objectif de ce niveau est d'identifier les besoins et les objectifs des futurs utilisateurs du système. Ce niveau peut être considéré comme un modèle du travail des futurs utilisateurs : quelles sont leurs activités ? Quels sont les rôles qu'ils doivent accomplir ? On commence par la définition des capacités opérationnelles, les acteurs et les entités opérationnelles qui interviennent pour réaliser ces capacités à l'aide de diagramme OCB (Figure. 6.2). Par la suite, on détermine les fonctions opérationnelles de chaque entité et acteur ainsi que les interactions entre les fonctions par des échanges opérationnels. Cela se fait à l'aide de diagramme OAB (Figure. 6.3). Le Tableau. 6.1 définit les principaux concepts utilisés par ARCADIA et leurs correspondances dans notre cas. La dernière colonne détermine le diagramme utilisé pour décrire chaque concept :

TABLE 6.1 – Les principaux concepts de l’analyse opérationnelle

Principaux concepts	Système ERTMS Régional	Diagramme
Les capacités opérationnelles	Organiser la circulation des trains	OCB
Les entités opérationnelles	- Matériels roulants - Mobilités - Infrastructure - Voie - Autres Systèmes de signalisation : BAL, BAPR et CCVBS - Système de gestion de la circulation des trains en sécurité - Service de planification des horaires	OCB
Les acteurs opérationnels	- Agent de conduite - Agent de service commercial train - Agent à poste	OCB
Les activités opérationnelles	- Gérer son train - Circuler sur les voies - Vérifier les billets de voyageurs - Gérer la circulation des trains en sécurité - Établir les tables horaires - Assurer le transport des trains - Effectuer de manœuvre exceptionnelle, déblocage du système - Gérer la circulation des trains en sécurité dans d’autre domaine	OAB
Les interactions opérationnelles	- Ordres alloués à l’agent de conduite - Ordres de conduite transmis - Mouvement disponible - Billets vérifiés - Ordres alloués au train - Présence de train - Tables horaires - Système débloqué - Compatibilité assurée	OAB

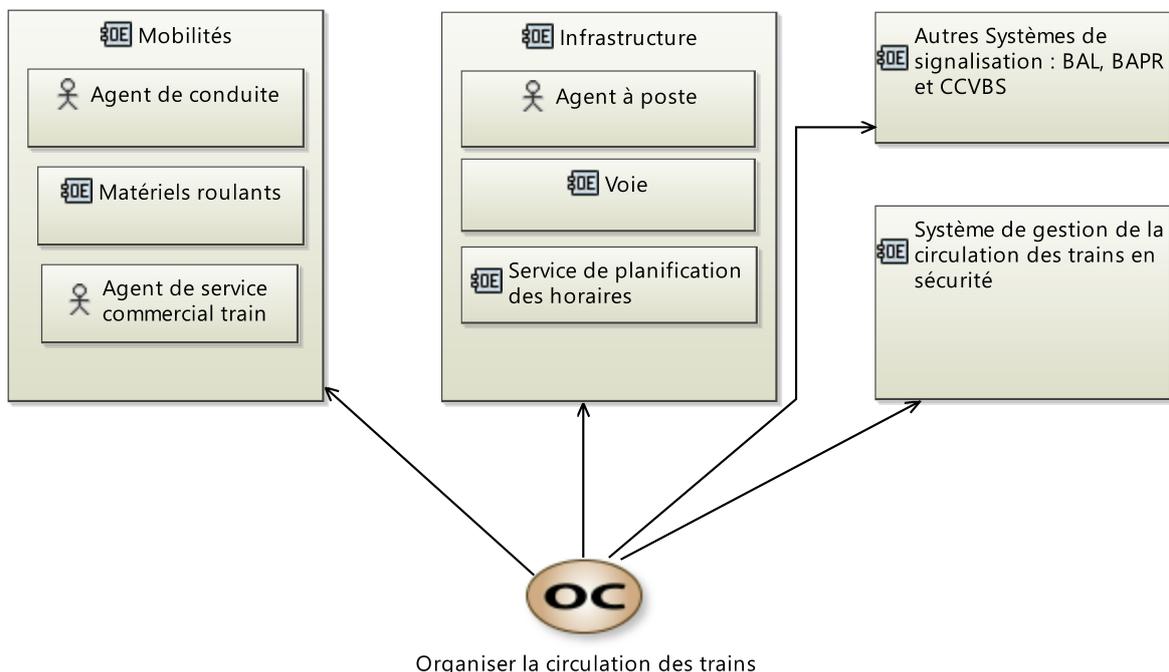


FIGURE 6.2 – Le diagramme OCB d’ERTMS Régional [OCB = Operational Capacities Blank]

L’analyse système

L’analyse système comprend l’identification des capacités et des fonctions du système qui satisfont les besoins opérationnels. Il s’agit ici d’effectuer une analyse fonctionnelle externe

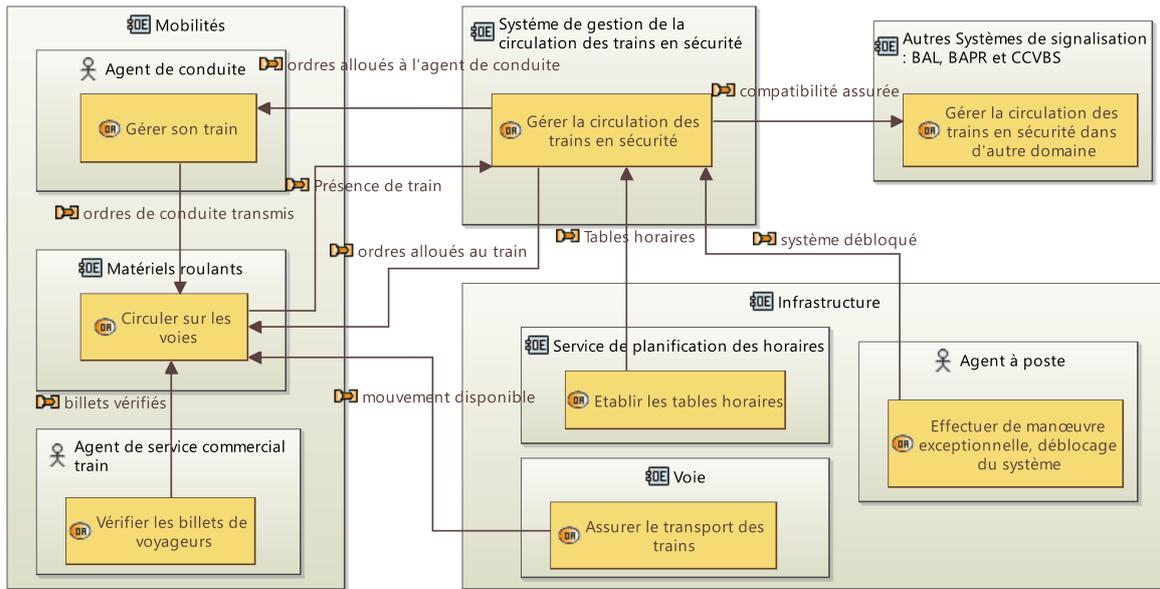


FIGURE 6.3 – Le diagramme OAB d’ERTMS Régional, [OAB = Operational Architecture Blank]

du système à l’étude pour identifier, en réponse, les fonctions du système nécessaires à ses utilisateurs. Si on a besoin de plus détailler les fonctions en sous-fonctions, on peut avoir recours aux diagrammes SDFB (Figure .6.4). Enfin, il est possible de définir l’architecture système de ce niveau (Figure .6.5). On peut y voir les différents échanges entre les fonctions du système. Pour cela, on définit le périmètre du système qui répond à la question : quelles sont les fonctions associées au système ? Les concepts utilisés dans la modélisation du niveau système ainsi que les diagrammes déployés sont rappelés dans le Tableau .6.2.

TABLE 6.2 – Les principaux concepts de l’analyse système

Les principaux concepts	Système ERTMS Régional	Les diagrammes
Système	- Système de signalisation	SAB
Fonctions du système (un raffinement; diagramme de décomposition fonctionnelle)	- Initialisation - Enclenchement et Espacement - Localisation des trains - Libération - Autorité de mouvement (AM) - Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train	SDFB (Figure. 6.4)
Échanges inter-fonctions du système. Il s’agit de procéder au raffinement des modèles	- Informations invariantes de la mission (numéro, longueur, matériel...) - Blocks disponibles - Dernier matériel dégagé avec marges - Tables d’enclenchement - Autorisation de marche	SDFB
Échanges entre le système, les acteurs et les entités extérieures	- Ordres alloués à l’agent de conduite - Ordres alloués au train - Présence de train - Tables horaires - Changements de limite et changements de marche envoyés - Système débloqué	SAB (Figure 6.5)

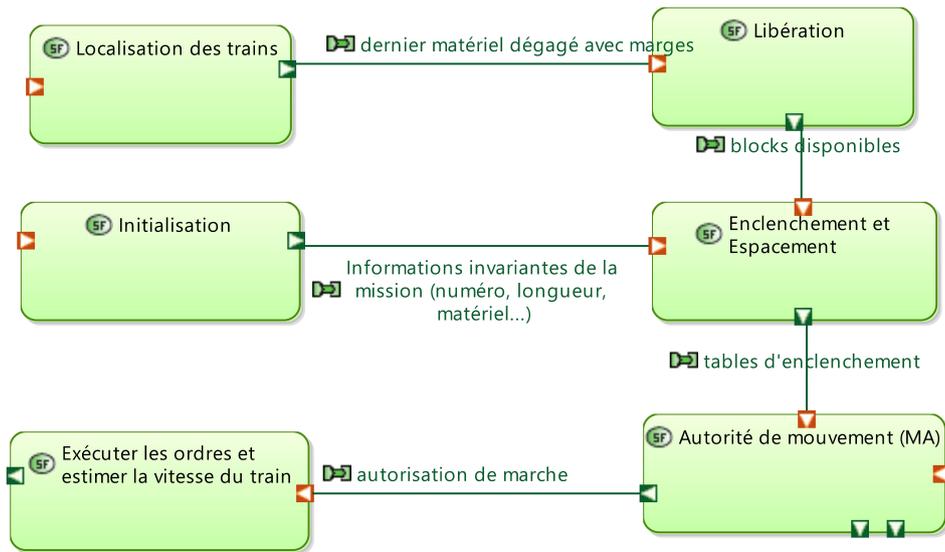


FIGURE 6.4 – Le diagramme SDFB d'ERTMS Régional, [SDFB =System Data Flow Blank]

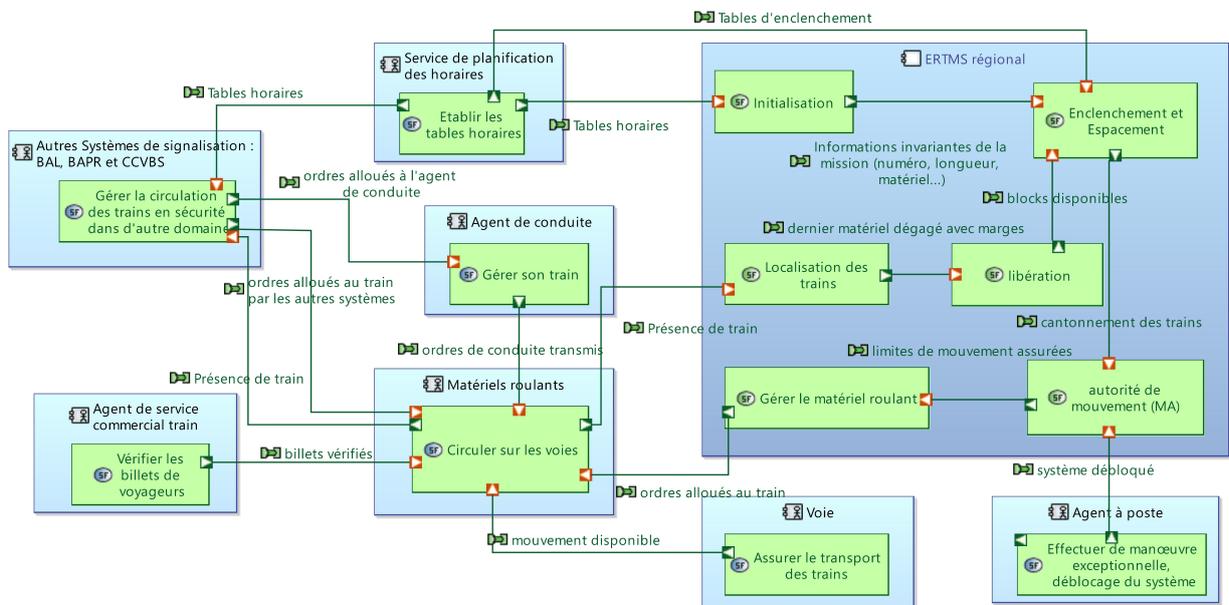


FIGURE 6.5 – Le diagramme SAB d'ERTMS Régional. [SAB=System Architecture Blank]

Architecture Logique

Cette étape décrit comment le système fonctionne pour répondre aux attentes (des sous-fonctions) par identification des composants logiques. Pour ERTMS régional, on définit quatre composants logiques (Système de gestion du trafic, Système de contrôle, Système de signalisation et Système d'identification de la situation courante). Les concepts utilisés dans la modélisation du niveau logique et les diagrammes déployés sont rappelés dans le Tableau .6.3.

TABLE 6.3 – Les principaux concepts de l’architecture logique

Les principaux concepts	Système ERTMS Régional	Les diagrammes
Les principaux concepts	-Système de signalisation -Système de contrôle - Système de localisation - Système de gestion du train	LAB (Figure .6.6)
Système ERTMS Régional		
Les diagrammes		
Composants logiques		
Fonctions logiques	- Enclenchement et Espacement - Localisation des trains - Libération - Autorité de mouvement (AM) - Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train	
Initialisation		
Échanges inter-fonctions logiques	- Informations invariantes de la mission (numéro, longueur, matériel...) - Blocks disponibles - Dernier matériel délogé avec marges - Tables d’enclenchement - Autorisation de marche	
Échanges entre le système logique, les acteurs et les entités extérieures	- Ordres alloués à l’agent de conduite - Ordres alloués au train - Présence de train - Tables horaires - Changements de limite et changements de marche envoyés	

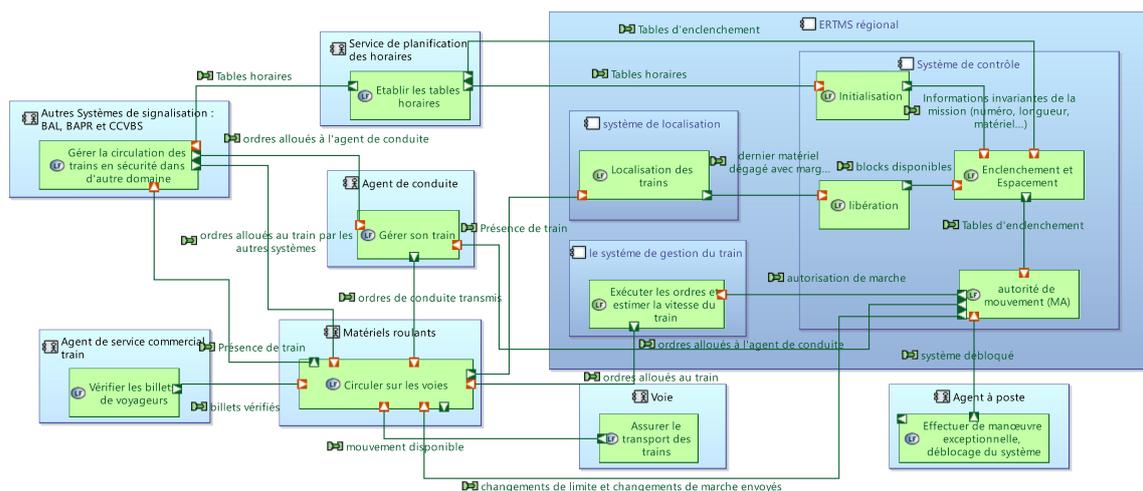


FIGURE 6.6 – Le diagramme LAB d’ERTMS Régional [LAB =Logical Architecture Blank]

Architecture Physique

L’architecture physique détermine comment le système sera développé et construit (définir l’architecture finale du système). Il s’agit du modèle le plus complet duquel un réseau Bayésien sera construit. Les concepts utilisés dans la modélisation du niveau physique et les diagrammes déployés sont rappelés dans le Tableau .6.4.

L’étude de la résilience a été appliquée à l’architecture physique ; cf. voir Figure. 6.7. L’architecture physique illustre la composition finale du système. L’ERTMS contient trois sous-systèmes : un grand rectangle jaune qui identifie le système ERTMS et contient les trois composants hôtes illustrés par trois rectangles jaunes : équipement au sol, équipement embarqué et équipement de contrôle. L’équipement au sol, qui contient les balises, les panneaux

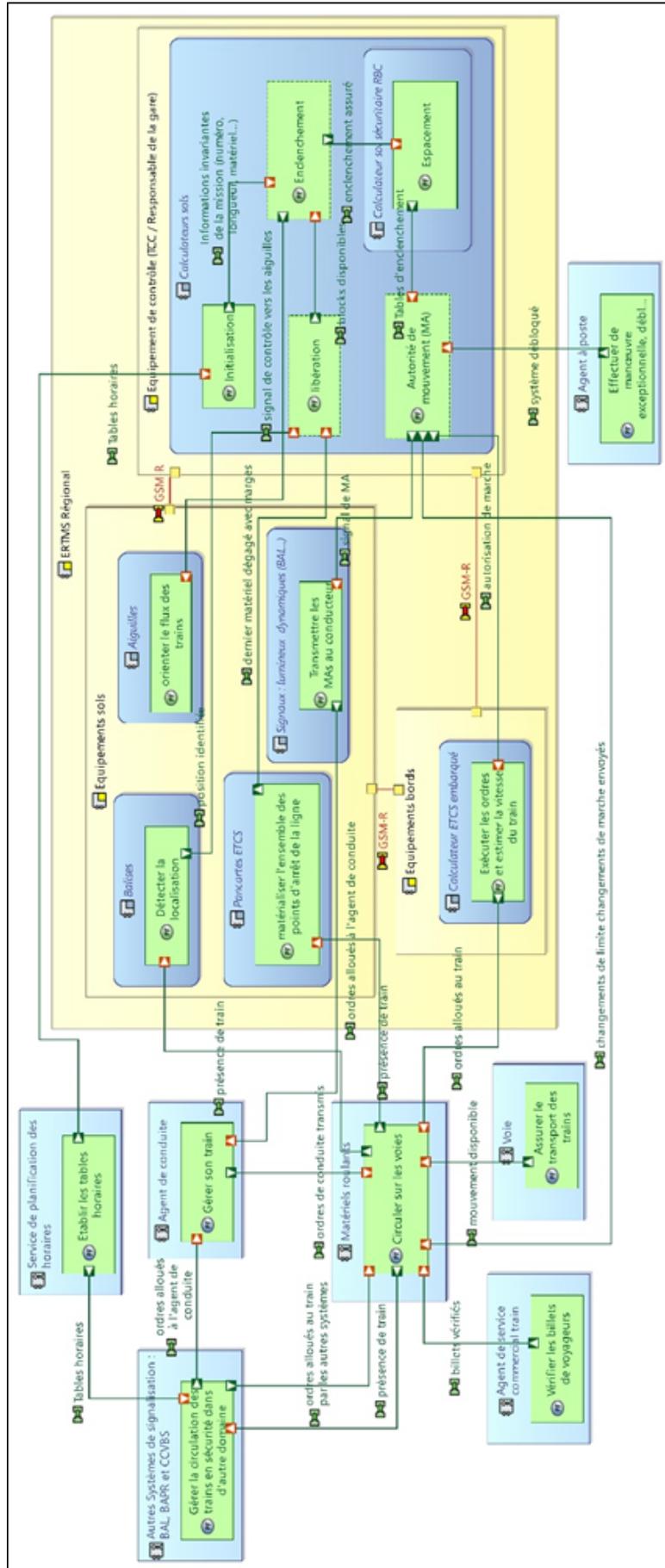


FIGURE 6.7 – Architecture physique de l'ERTMS

TABLE 6.4 – Les principaux concepts de l’architecture physique

Les principaux concepts	Système ERTMS Régional	Les diagrammes
Composants physiques de comportement	- Pancartes ETCS - Aiguilles - Signaux : lumineux dynamiques (BAL...) - Calculateur ETCS embarqué - Calculateurs sols - Calculateur sol sécuritaire RBC - Balises	PAB (Figure .6.7)
Composants physiques de nœud	- ERTMS Régional - Équipements sols - Équipements bords - Équipement de contrôle (TCC / Responsable de la gare)	
Les fonctions physiques	- Initialisation - Libération - Enclenchement - Espacement - autorité de mouvement (AM) - Détecter la localisation - matérialiser l’ensemble des points d’arrêt de la ligne - Transmettre les MAs au conducteur - Orienter le flux des trains - Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train	
Échanges entre le système physique, les acteurs et les entités extérieures	- Ordres alloués à l’agent de conduite - Ordres alloués au train - Présence de train - Tables horaires - Changements de limite et changements de marche envoyés - Système débloqué	
Échanges entre les fonctions systèmes	- Informations invariantes de la mission (numéro, longueur, matériel...) - Blocs disponibles - Dernier matériel dégagé avec marges - Table d’enclenchement - Autorisation de marche-Position identifiée -Signal de contrôle vers les aiguilles -Signal de AM -Enclenchement assuré	

ETCS, les signaux et les aiguillages, est principalement destiné à détecter la position du train et à organiser le trafic. Les informations relatives à la position sont envoyées aux autres sous-systèmes via un système radio GSM-R (*GSM for railways*). Le système de contrôle basé sur le TCC (*Traffic Control Center*) gère le trafic et contient plusieurs calculateurs au sol qui assurent la libération des blocs (c’est-à-dire des sections de rail) et la gestion des enclenchements des itinéraires sur la base des horaires fournis par le service de planification des horaires. Ce sous-système est utilisé pour émettre des ordres d’autorisation de mouvement. Ces informations sont transmises aux équipements embarqués via GSM-R. Les calculateurs ETCS embarqués exécutent ces ordres et estiment la vitesse du train afin d’assurer la séparation et la sécurité de la circulation des trains.

6.3.2 Phase 2 : Modèle de dépendance (DM).

Sur la base des diagrammes de la première étape, les matrices de dépendances sont créées (Design Structure Matrix (DSM) et Domain Mapping Matrices (DMM)) où un "1" indique l’existence d’une dépendance entre le couple d’entités. Cependant, les données de liaison dans ces matrices sont différentes les unes des autres car à chaque niveau de la méthodologie ARCADIA, le système est modélisé selon une perspective donnée. Au premier niveau, la matrice fournit les liens entre les acteurs/entités externes. Il s’agit d’une macro-représentation de l’environnement du système. Elle donne le DSM_{op} qui relie les acteurs externes et le

DMM_{op} qui décrit les interactions à travers leurs fonctions.

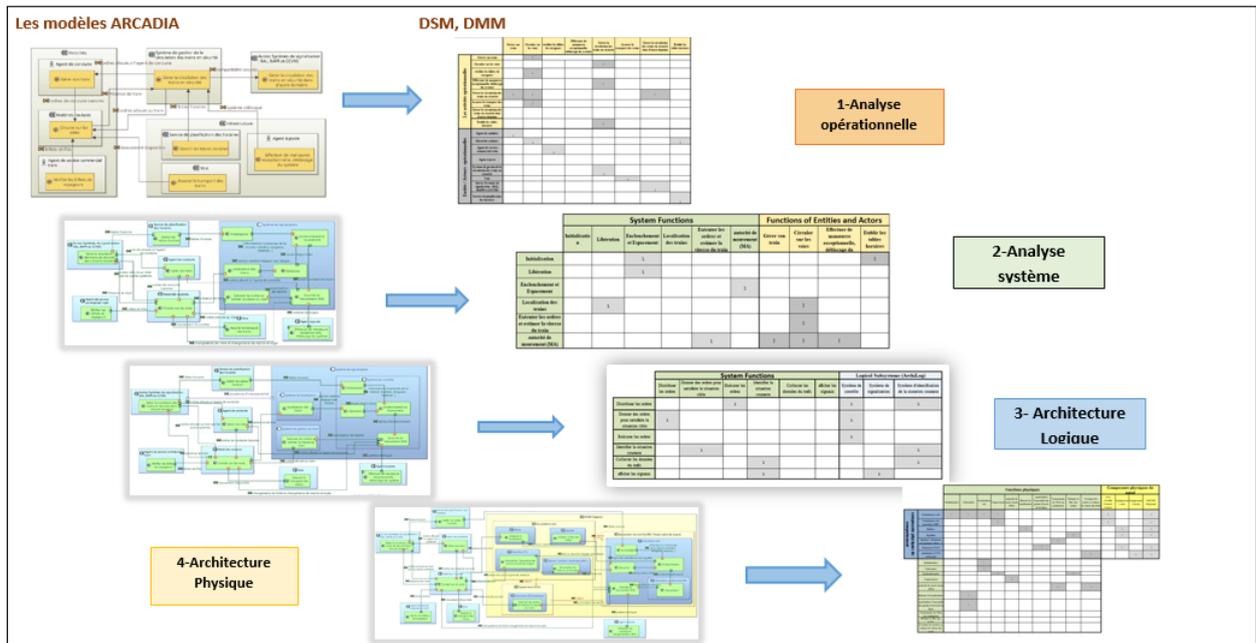


FIGURE 6.8 – Le passage d'ARCAID vers DM

Dans un deuxième temps, on décrit le système et ses fonctions. On a donc le DSM_{sys} qui relie les fonctions internes, et le DMM_{sys} qui montre les liens du système avec son environnement. Dans le troisième niveau : l'architecture logique, nous divisons le système en sous-systèmes. Le DMM_{log} fixe "qui fait quoi" dans l'analyse logique du système. Pour l'architecture physique, la création de l'architecture finale se fait en définissant les composants physiques des nœuds qui contiennent les composants physiques des comportements, c'est-à-dire DMM_{nodp} . DMM_{phi} modélise les fonctions physiques des composants ; "qui fait quoi dans le système". La dernière étape est l'association de l'élément de configuration avec les différents composants du système, DMM_{config} .

La Figure. 6.8 montre le passage des modèles d'ARCADIA vers les matrices DSM et DMM. Toutes les matrices DSM et DMM issues des modèles ARCADIA sont regroupées dans l'annexe 2. Le modèle de dépendance globale est extrait de l'architecture physique ; voir Figure. 6.22.

6.3.3 Phase 3 : Transformation du DM en réseau bayésien.

La structure des RBs

Enfin, le RB, utilisant les matrices de dépendance, est généré en appliquant les règles de transformation proposées dans la section 5.3.3.

Les nœuds dans le RB représentent soit des fonctions soit des composants et ils sont modélisés de la même manière. Tous les nœuds du RB sont automatiquement représentés en

bleu par BayesiaLab. Mais pour distinguer les fonctions et les composants, ils sont associés à des couleurs différentes :

- Composant physique du système en bleu
- Composant d'hébergement du système en jaune
- Fonction du système en vert
- Composant externe en bleu ciel (entités externes)
- Fonction des composants externes en vert pistache

Estimation de l'information pour les probabilités marginales et conditionnelles

L'obtention de la structure des réseaux Bayésiens ne constitue qu'une première partie de leur définition. Il est nécessaire de définir pour chaque nœud du réseau :

- La probabilité marginale pour les nœuds n'ayant pas de parents,
- Les tables de probabilités conditionnelles pour les autres.

Dans le cadre de cet exercice, nos échanges avec les collègues de l'IFSTTAR ont permis de compléter ces tableaux. Toutefois, le lecteur doit prendre en compte le fait que ces probabilités peuvent ne pas correspondre à la réalité. Notre objectif est de démontrer avant tout la réalisabilité de l'approche proposée même si des écarts pourraient subsister entre les valeurs numériques des probabilités et la réalité.

Ces précautions prises, nous avons procédé à une série de tests afin d'établir la cohérence des résultats fournis par le réseau Bayésien suite à l'application de scénarios divers. La procédure utilisée dans cette étape cherchant à vérifier et à valider le réseau en procédant par des vérifications est décrite ci-après. Nous avons pour cela utilisé 35 scénarios (voir la Figure. 6.9) :

En colonnes et lignes, sont indiqués tous les nœuds regroupés selon leur nature :

- Système ERTMS Régional
 - Composants du système; Composants du nœud (hébergeur ou d'accueil) et Composants de comportement
 - Fonctions du système
- Environnement de l'ERTMS Régional
 - Entités ou acteurs extérieurs
 - Fonctions des entités et acteurs extérieurs
- Un nœud Cible a été choisi. Il s'agit du nœud « Autorisation de mouvement ». Toutes les simulations cherchaient à établir la nouvelle probabilité de la modalité « Réalisable » de ce nœud. On cherche donc : $P(MA=Réalisable) = ?$
- Simulation 0 : Lors du paramétrage initial, toutes les probabilités sont saisies, nœud par nœud. Le fait d'activer le réseau, les probabilités des nœuds sont mises à jour grâce à

la propagation première des conditions. Ces résultats sont affichés dans la ligne noire de la figure 13.

- Simulations 1 à 6 :
 - Pour chaque scénario il a été supposé que toutes les entités sont observées à 100% opérationnelles sauf une dont la probabilité d'être opérationnel est mise à 80%.
 - Exemple Scénario 1 : $P(\text{Agent à Poste} = \text{Opérationnel}) = 80\%$,
 $P(\text{autres entités ext.} = \text{Opérationnel}) = 100\%$.
- Simulation 7 à 15 :
 - Pour chaque scénario il a été supposé que toutes les fonctions externes sont observées à 100% réalisables sauf une dont la probabilité d'être réalisable est mise à 95%.
 - Exemple Scénario 7 : $P(\text{Circuler sur les voies} = \text{Réalisable}) = 95\%$, $P(\text{autres fonctions ext.} = \text{Réalisable}) = 100\%$
- Simulation 15 à 18 :
 - Pour chaque scénario il a été supposé qu'un composant est opérationnel à 90%. Nous avons recherché à caractériser son influence sur le système. - Exemple Scénario 15 : $P(\text{ERTMS} = \text{Opérationnel}) = 90\%$
- Simulation 19 à 25 :
 - Pour chaque scénario il a été supposé que tous les composants de comportement du système sont observés à 100% opérationnels sauf un dont la probabilité d'être opérationnel est supposée à 0% (autrement dit le composant est en défaillance).
 - Exemple Scénario 19 : $P(\text{aiguilles} = \text{Opérationnel}) = 0\%$, $P(\text{autres composants hébergeurs} = \text{Opérationnel}) = 100\%$
- Simulation 26 à 35 :
 - Pour chaque scénario il a été supposé qu'une fonction est non-réalisable.
 - Exemple Scénario 26 : $P(\text{Orienter le flux des trains} = \text{Réalisable}) = 0\%$

Le Tableau. 6.9 regroupe les probabilités des nœuds pour chaque scénario appliqué.

La transition des modèles de dépendance aux réseaux bayésiens est représentée dans la Figure. 6.10. Les réseaux bayésiens pour chaque niveau d'ARCADIA sont présentés dans l'annexe 3. Dans la suite du travail, nous nous basons sur le RB de l'analyse physique du système qui est représenté dans la Figure 6.11.

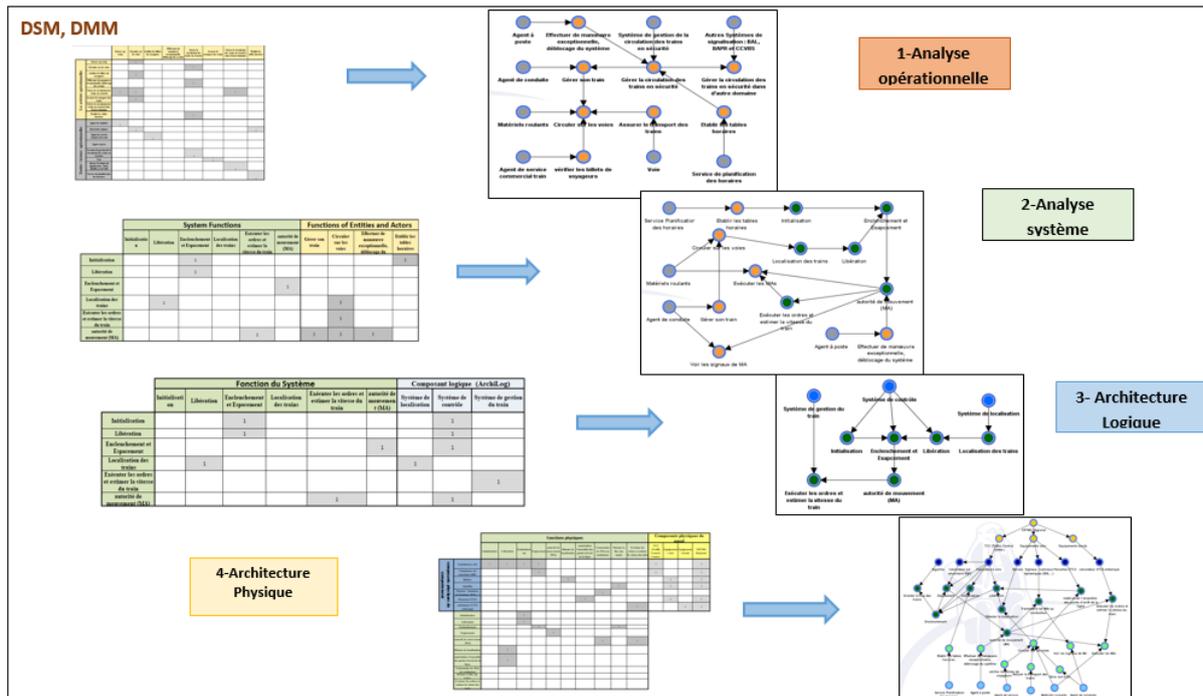


FIGURE 6.10 – Le passage de DM vers les RBs

6.4 Deuxième étape : Simulations de réseau bayésien pour étudier la résilience à l’obsolescence de l’ERTMS

Afin de présenter l’étude de résilience, nous avons utilisé un sous-graphe du réseau bayésien en supposant que les autres variables (c’est-à-dire les nœuds) du réseau ne deviendraient pas obsolètes tout au long de l’étude, voir la Figure. 6.13. [Zolghadri u. a. \(2020\)](#) ont déterminé que l’un des paramètres importants pour définir les stratégies de remédiation de l’obsolescence est l’horizon d’observation. Pour fixer les idées, l’horizon d’observation est de deux ans. Cela signifie que toutes les probabilités d’occurrence de l’obsolescence sont estimées par rapport à cet horizon. En d’autres termes, on détermine la probabilité que le composant en question devienne obsolète dans cet horizon de 2 ans.

6.4.1 Indicateurs de performance pour le système ERTMS

L’autorité de mouvement (AM) est la fonction la plus critique de l’ERTMS pour des raisons liées aux observations suivantes :

- Les experts de la Société Nationale des Chemins de Fer Français considèrent cette fonction comme la plus critique car elle définit les ordres de mouvement (autorisation d’utiliser une section de la voie, d’arrêter ou de passer ou de vitesse) pour tous les trains circulant sur le rail. Ces ordres garantissent la parfaite sécurité des usagers, mais aussi la performance du matériel roulant utilisé et des chemins de fer.

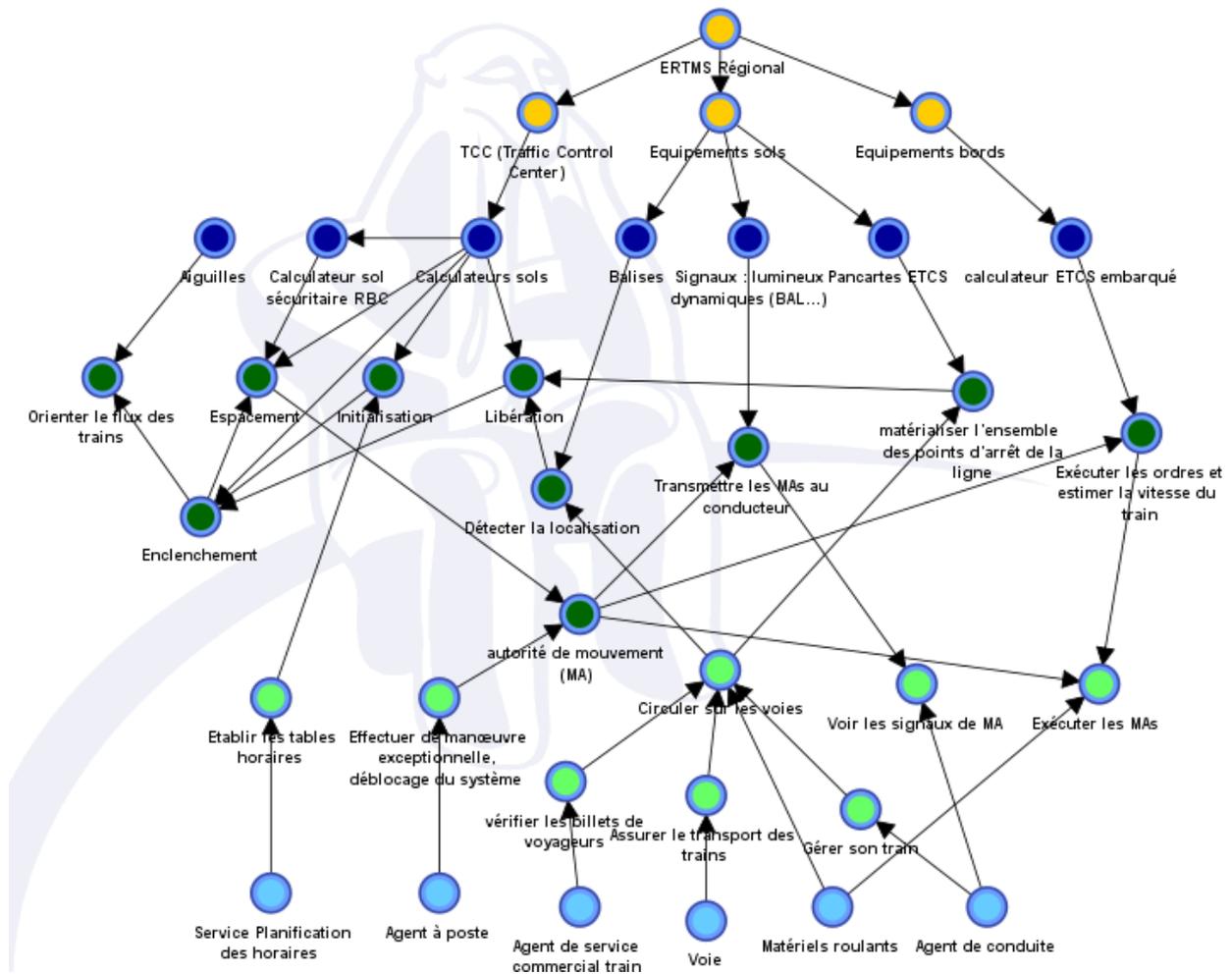


FIGURE 6.11 – Réseau bayésien de l'architecture physique de l'ERTMS

- AM appartient à deux des trois chaînes fonctionnelles qui doivent être réalisées par l'ERTMS. Une chaîne fonctionnelle est une représentation du flux de données fonctionnelles qui montre les dépendances entre différentes fonctions (Roques, 2017). L'exécution des fonctions les unes après les autres dans une chaîne fonctionnelle permet d'exécuter une fonctionnalité du système.
- Le logiciel BayesiaLab permet de construire une image 2D, Figure 6.12, où la taille des nœuds est proportionnelle à leurs forces. La force du nœud est directement obtenue comme la somme de toutes les forces des arêtes entrantes et sortantes. L'ouvrage de Conrady und Jouffe (2015) montre que la force de l'arc est calculée en utilisant la divergence de Kullback-Leibler qui compare deux distributions de probabilité conjointes. On peut y voir que le nœud "Autorité de mouvement" est le plus important. Cela est interprété comme le fait que la connaissance de l'état de cette variable aléatoire a un pouvoir prédictif très élevé pour les autres nœuds.

Afin de réaliser l'étude, un indicateur de performance lié à la fonction AM a dû être établi. Au cours de l'étude, il a été établi aussi que la réalisabilité de la fonction AM doit être assurée

indépendamment du choix des alternatives de conception, pour des raisons évidentes liées à la sécurité des usagers. Afin que le système de signalisation ERTMS puisse être certifié par des organismes de certification indépendants, une limite inférieure a été imposée dans le cadre du projet sur l'indicateur de réalisabilité. Pour des raisons de confidentialité, nous avons modifié cette valeur et utilisé un taux de réalisabilité minimum de 97%.

Analyse des nœuds (taille) : Force des nœuds

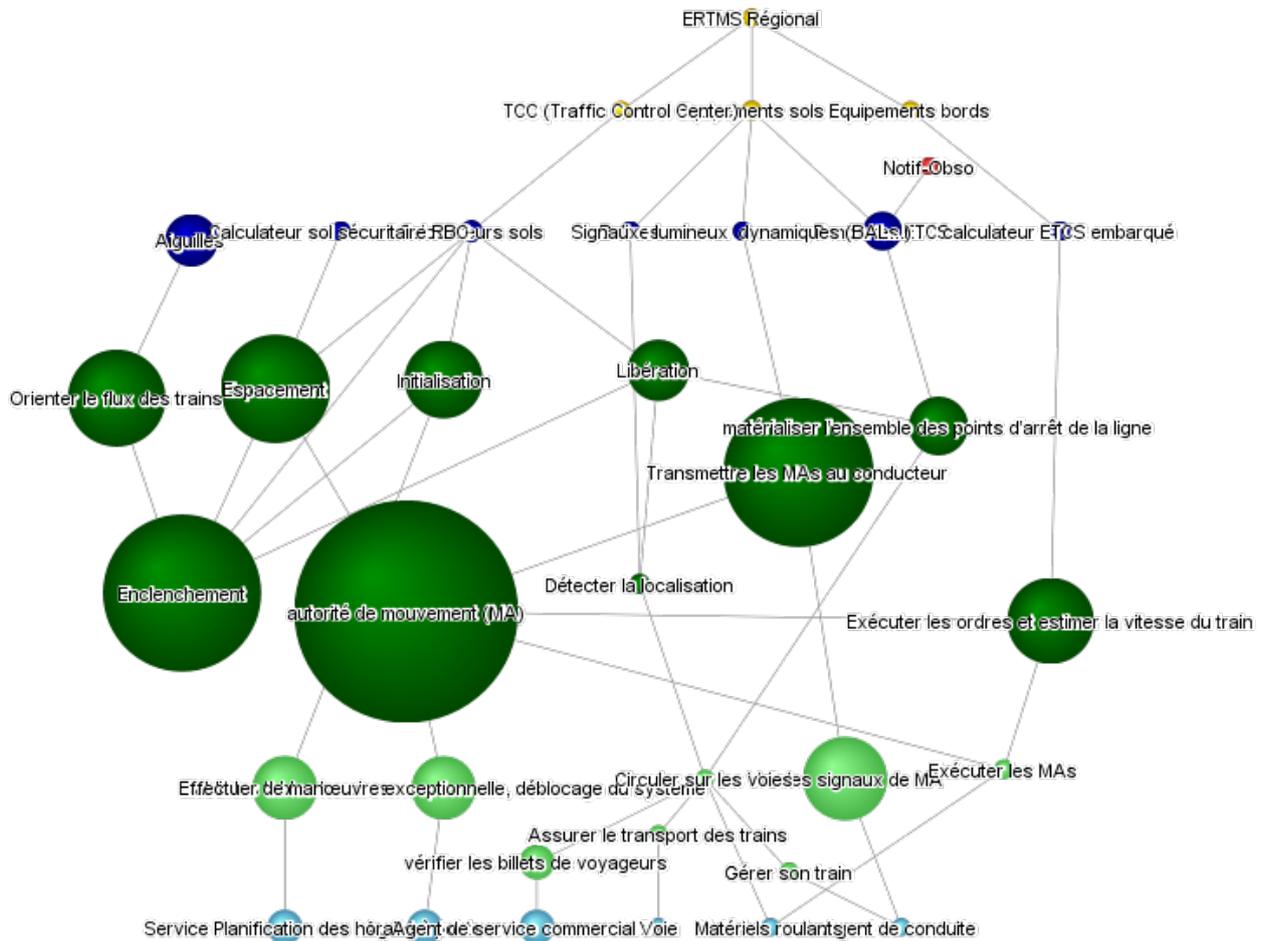


FIGURE 6.12 – Le réseau bayésien en 2D de l'architecture physique

6.4.2 Élaboration de scénarios et génération d'alternatives

Un brainstorming structuré a été effectué entre l'expert du réseau ferroviaire, l'expert du système ERTMS, l'expert du système de signalisation et nous. Nous avons procédé à l'interrogation de ces experts tout en prolongeant les discussions jusqu'à obtenir, à chaque fois, un consensus. Sur la base de cette technique, nous avons choisi deux scénarios. Le RBC (*Secure Ground Calculator*) est un module du système de contrôle communiquant, via GSM-R, avec les trains. Pour assurer la sécurité des trains, le RBC définit l'espacement des trains (nœud parent de l'AM, voir Figure.6.11). Le premier scénario de l'étude de résilience a été défini comme un choix possible entre deux modules concurrents. Trainguard 200 RBC est développé par

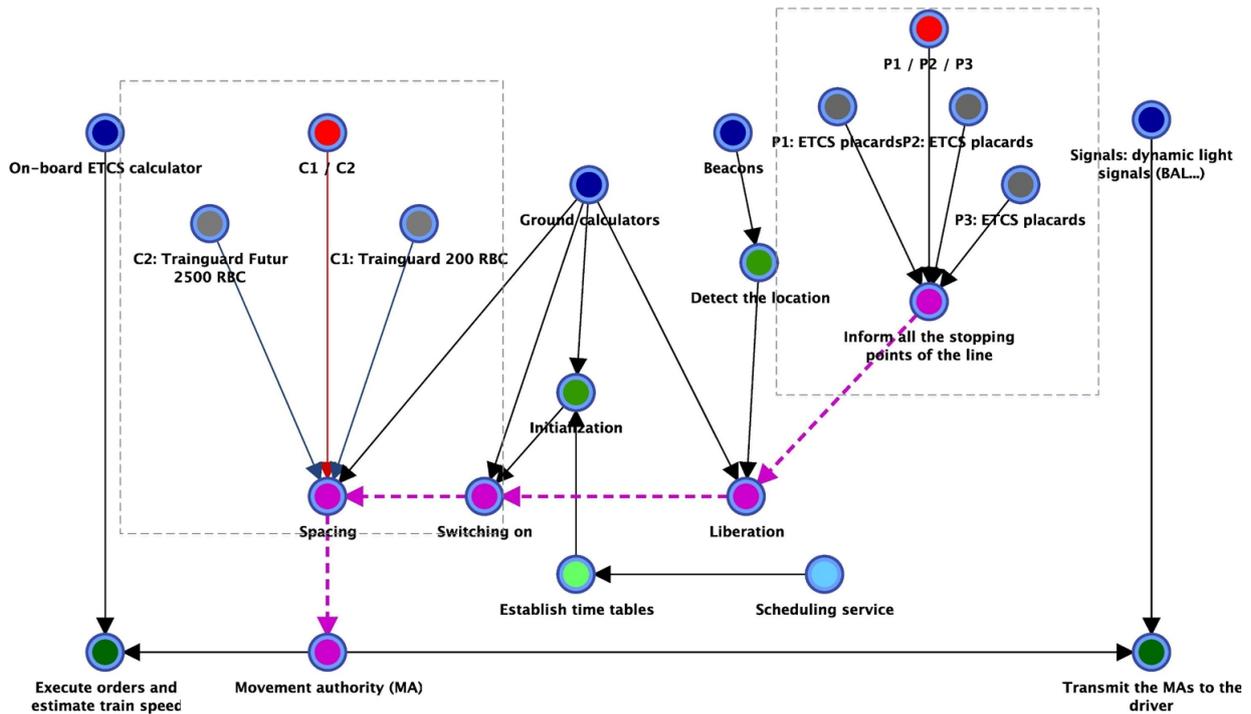


FIGURE 6.13 – Réseau bayésien simplifié de l'architecture physique de l'ERTMS

Siemens et utilisé aujourd'hui dans de nombreux systèmes de contrôle. Trainguard Future 2500 RBC (Siemens, 2016) est une technologie plus récente qui augmente la vitesse de traitement des données et la réponse. Elle a été considérée comme une seconde alternative. Un deuxième scénario d'obsolescence est choisi sur les composants des plaques ETCS P1, cf. Figure. 6.13. Ce composant fait partie des équipements au sol et regroupe tous les points d'arrêt de la ligne. Deux alternatives P2 et P3 (technologies plus récentes) ont également été choisies. Les TPC des nœuds alternatifs sont représentés par le tableau. 6.5 qui contient les probabilités que ces composants deviennent obsolètes dans les deux ans. Ces alternatives de conception ont été représentées par des nœuds dans le RB simplifié, voir les rectangles en pointillés dans la Figure. 6.13.

TABLE 6.5 – TPCs de C1, C2 ,P1, P2 et P3

	Obsolète (%)	Non Obsolète (%)
C1	35	65
C2	0.01	99.99
P1	3	97
P2	1.5	98.5
P3	0.5	99.5

Enfin, deux nœuds de contrôle $C1/C2$ et $P1/P2/P3$ ont été ajoutés au réseau. Leur rôle est de représenter dans le même réseau bayésien les six combinaisons possibles de C_i/P_j qui constituent les alternatives de conception pour l'ensemble du système. Le choix d'une

TABLE 6.6 – Simulations de diagnostic

Réalisabilité d'AM (%)	C1	C2	P1	P2	P3
90	50,71	49,29	33,35	33,33	33,32
91	50,59	49,41	33,35	33,33	33,32
92	50,46	49,54	33,34	33,33	33,32
93	50,34	49,66	33,34	33,33	33,32
94	50,21	49,79	33,34	33,33	33,32
95	50,08	49,92	33,34	33,33	33,33
96	49,95	50,05	33,33	33,33	33,33
97	49,82	50,18	33,33	33,33	33,34
98	49,69	50,31	33,33	33,33	33,34
99	49,55	50,45	33,32	33,33	33,34
100	49,42	50,58	33,32	33,34	33,35

combinaison particulière C_i/P_j est assuré par les valeurs de probabilité des modalités des nœuds $C1/C2$ et $P1/P2/P3$. L'étude de la résilience du système ERTMS, modélisé par le réseau simplifié, consiste donc à déterminer la combinaison C_i/P_j qui assure la plus grande réalisabilité d'AM. Ce RB simplifié garde la trace des nœuds qui affectent ou sont affectés par les scénarios.

6.4.3 Simulations et interprétations

Pour choisir la meilleure combinaison d'alternatives, deux séries de simulations ont été effectuées sur la chaîne fonctionnelle représentée par la ligne pointillée violette dans la Figure. 6.13. Il convient de noter que cette chaîne fonctionnelle représente en fait la chaîne causale qui relie les choix de conception ou les combinaisons d'alternatives à la fonction AM dont nous étudions la résilience à ces choix.

Diagnostic. Une probabilité de réalisabilité d'AM est imposée dans la plage [90%, 100%] et les probabilités d'occurrence des modalités des nœuds de contrôle $C1/C2$ et $P1/P2/P3$ sont recueillies. L'analyse de ces probabilités permet d'identifier la combinaison de solutions de conception ayant la probabilité la plus élevée. Cela signifie que c'est cette combinaison d'alternatives qui est la cause la plus probable de cette performance. Les résultats de ces simulations sont présentés dans le Tableau. 6.6.

Les résultats de l'étude diagnostique sont présentés séparément pour le choix entre C1 et C2, Figure. 6.14, et le choix entre P1, P2 et P3, Figure. 6.15. Dans ces figures, les rectangles transparents représentent les zones sur lesquelles l'étude se concentre. Il s'agit de la fenêtre [97%, 100%]. Nous avons également fourni des données pour une réalisabilité inférieure à 97% afin de montrer les variations totales. On peut voir que lorsque les exigences de réalisabilité augmentent vers 100 %, la combinaison la plus appropriée semble être $(C2, P3)$. C'est un

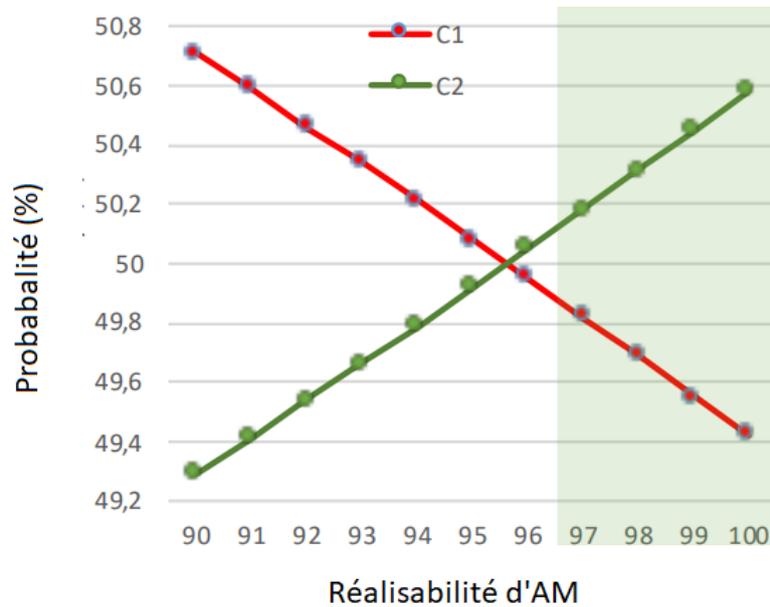


FIGURE 6.14 – L'évolution des probabilités de C1 et C2 en fonction de la réalisabilité d'AM

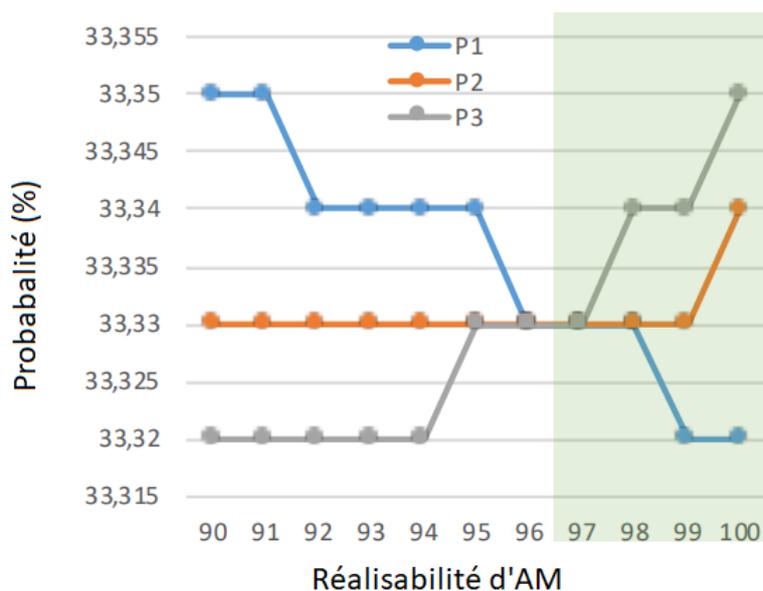


FIGURE 6.15 – L'évolution des probabilités de P1, P2 et P3 en fonction de la réalisabilité d'AM.

résultat logique puisque les probabilités d'obsolescence de ces composants sur les deux années de l'horizon d'observation sont les plus faibles. On peut néanmoins noter que le choix du composant parmi P1, P2 ou P3 lorsque la réalisabilité est égale à 97% (c'est-à-dire la limite inférieure de l'indicateur de performance) est indifférent ; aucun composant n'est préféré. Cependant, cette situation change très rapidement dès que l'on s'éloigne de cette limite.

Pronostic. Dans cette posture, on associe certaines probabilités aux modalités des nœuds

de contrôle (c'est-à-dire les causes) et on détermine les performances de l'AM en termes de réalisabilité (c'est-à-dire l'effet). Les résultats de ces simulations sont regroupés dans le Tableau.6.7.

TABLE 6.7 – Simulations de pronostic

RBC alternatives	ETCS placards alternatives	Réalisabilité d'AM (%)
C1	P1	94,49
C1	P2	94,53
C1	P3	94,56
C2	P1	96,66
C2	P2	96,7
C2	P3	96,73

La Figure.6.16 représente l'effet du choix de C1 ou C2 sur la réalisabilité d'AM pour les différents choix possibles de P1, P2 et P3. Les courbes sont superposées, voire fusionnées. On peut également représenter la réalisabilité d'AM en fonction de P1, P2 et P3 pour le choix de C1 et C2, Figure.6.17. Dans cette dernière figure, on peut voir que le choix de C1 ou C2 a un impact significatif sur la réalisabilité de l'AM obtenue ; les valeurs de l'AM pour C2 sont nettement supérieures à celles obtenues pour C1. En comparant ces figures, on peut conclure que le choix entre C1 ou C2 a un impact plus important sur la réalisabilité de l'AM que le choix de P1, P2 et P3.

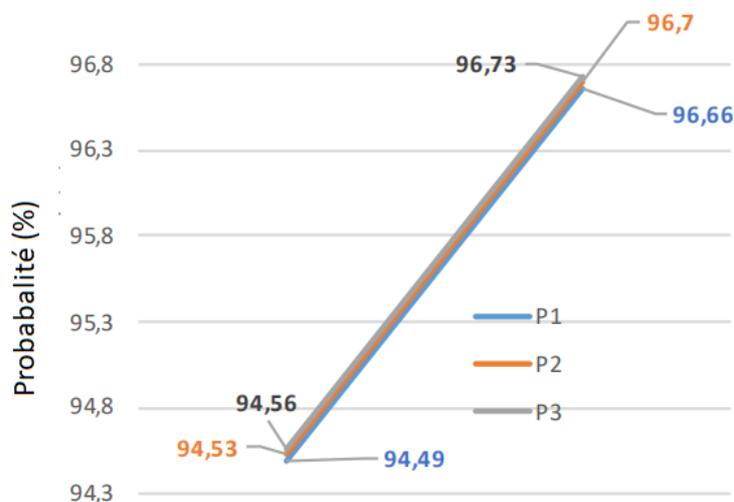


FIGURE 6.16 – Réalisabilité d'AM basée sur C1 et C2

6.5 Conclusion

L'opportunité de ce projet ERTMS et l'accès à une partie des données et surtout à l'expertise des parties prenantes du ferroviaire Français et européen ont été une très grande chance.

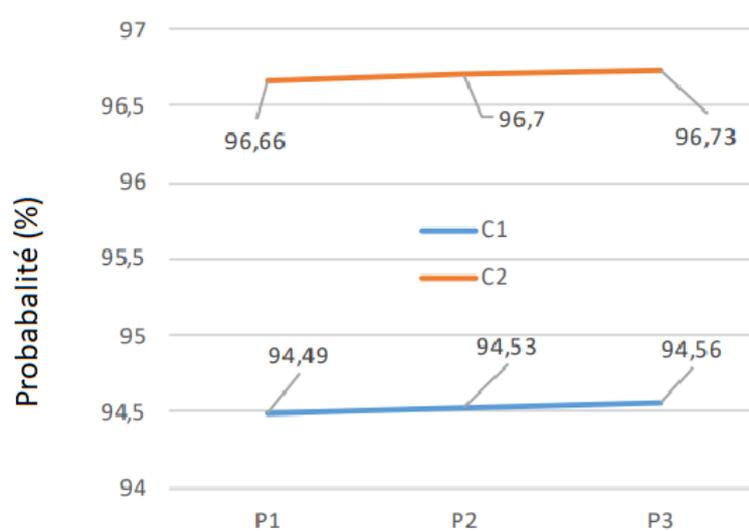


FIGURE 6.17 – Réalisabilité d'AM basée sur P1, P2 et P3

Elle a permis de déployer la méthodologie ORByC et surtout l'ajuster alors que se mêlent à la fois les sources de données techniques et les connaissances expertes. Cette collaboration a permis de vérifier notre thèse consistant à dire que les modèles probabilistes bayésiens permettent de piloter des chantiers de (re-)conception de systèmes complexes en vue d'atteindre une résilience à l'obsolescence viable. Cependant, ce cas d'étude nous avait fait aussi rendre compte que la condition *sine qua non* de réussite est que toutes les parties prenantes puissent contribuer, de manière concourante, à de tels chantiers.

Conclusion générale

Le progrès technologique et les changements accélérés des besoins des clients amènent les concepteurs à améliorer et changer la conception des produits et des systèmes. Il s'agit d'un défi techniquement et économiquement difficile à relever. Dans ce contexte, il devient nécessaire de prendre en compte l'obsolescence potentielle des composants, des technologies et des fonctions au stade de la conception. L'obsolescence étant inévitable, la conception doit garantir le respect des exigences fonctionnelles, de performance et de qualité, ainsi que des contraintes imposées aux produits. Cette propriété est désignée dans ce travail comme la résilience à l'obsolescence.

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport explorent l'architecture d'un produit ou d'un système pour déterminer les modèles de dépendance entre ses différents constituants. L'architecture du produit est déterminée à l'aide d'une approche d'ingénierie des systèmes basée sur les modèles, à savoir ARCADIA. Cette architecture est ensuite transformée en un RB. Il s'agit d'un graphe probabiliste avec un formalisme d'inférence reconnu qui est ensuite utilisé pour déterminer la sensibilité d'un composant et/ou d'une fonction, voire d'une chaîne fonctionnelle (par exemple, la réponse à un besoin du client) aux variations imposées aux autres nœuds du réseau. Des scénarios sont utilisés pour définir ces variations. Ces scénarios sont notamment définis grâce à des entretiens avec des experts du système. Ces études prennent la forme de diagnostics et de pronostics dont le principe repose sur l'exploitation des chemins de cause à effet. Pour ces études, nous avons eu recours au logiciel BayesiaLab qui reste l'outil de référence pour manipuler les réseaux bayésiens. Les observations faites à partir des résultats des études de diagnostic et de pronostic nous permettent de faire des recommandations sur la conception du système pour une meilleure résilience à l'obsolescence. Une récapitulation de la méthodologie est représenté par la Figure. 6.18. Cette méthodologie est appelée ORByC et se base sur l'ingénierie des systèmes, l'analyse des dépendances et le formalisme des réseaux bayésiens. Il représente un véritable outil d'aide à la décision pour les concepteurs de systèmes. La méthodologie est ensuite appliquée à un cas réel pour en démontrer sa validité et surtout sa pratique. Elle a ainsi permis de proposer une véritable recommandation de conception dès lors qu'un indicateur de performance est associé à une fonction particulière du système.

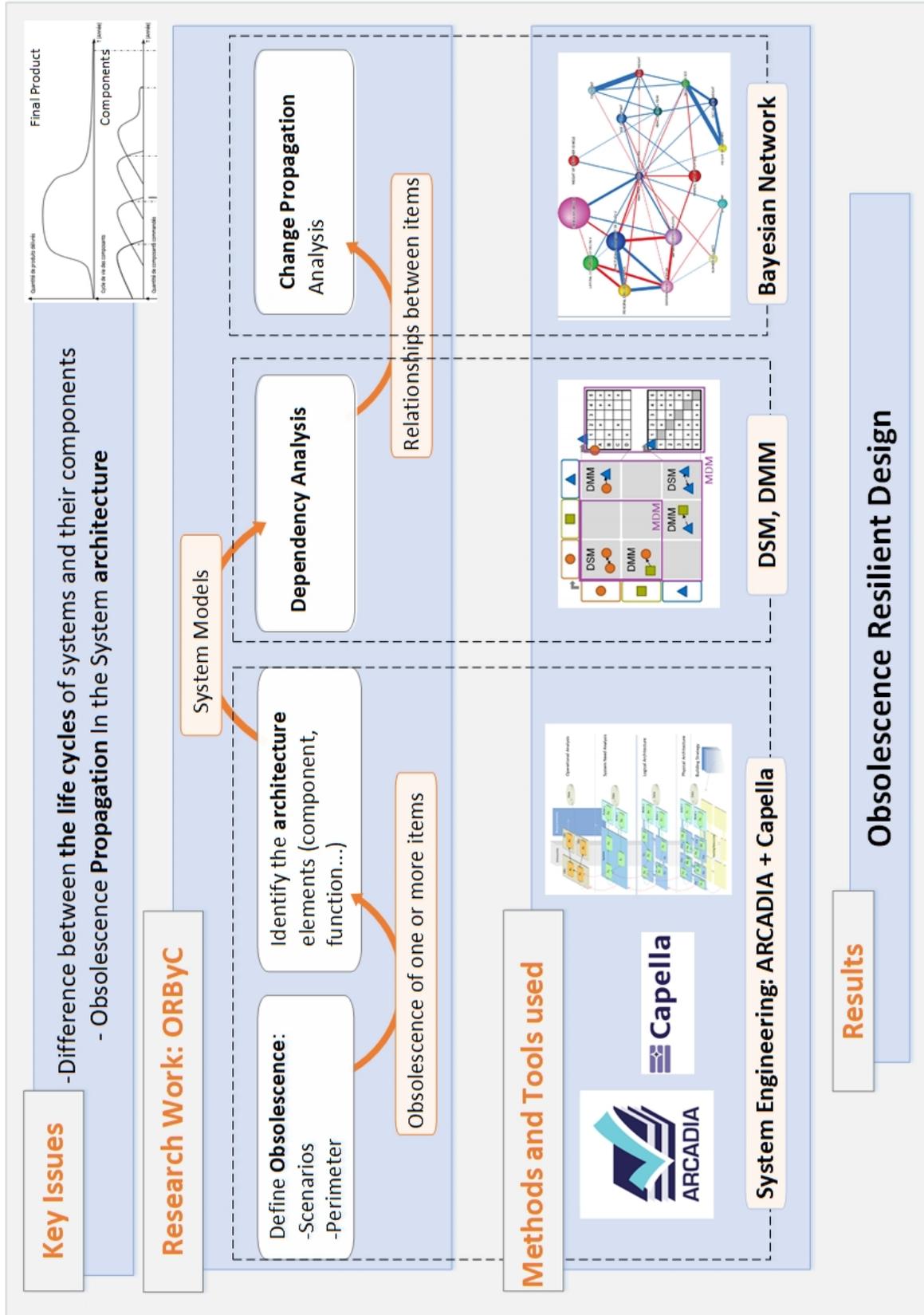


FIGURE 6.18 – Récapitulation de nos travaux

L'application de la méthodologie ORByC a démontré un certain nombre d'avantages :

- Le fait de se baser sur les modèles d'architecture d'un système garantit une traçabilité permettant tout retour en arrière lors de la conception du système.
- L'utilisation d'ARCADIA avec un outil de modélisation Open Source, Capella, apporte un avantage non négligeable dans l'utilisation a posteriori des modèles qui peuvent être utilisés pour faire évoluer le système.
- La transformation des modèles d'architecture système, structurés et collectés dans Capella, en un réseau bayésien est une approche unique et originale qui facilite grandement la modélisation du système d'intérêt via des matrices de dépendances.
- Les études de diagnostic et de pronostic sont capables de proposer des recommandations de conception, traduites en combinaisons d'alternatives de conception.

Néanmoins, plusieurs améliorations doivent être apportées à la méthodologie ORByC. Ce travail présente les limites suivantes :

- Dans le cas de systèmes très complexes, il n'est pas possible de passer manuellement des modèles ARCADIA à DSM. Une approche automatisée de la transition est essentielle pour poursuivre les prochaines étapes de la méthodologie ORByC.
- Même si nous établissons une liste des éléments les plus critiques dans la création de scénarios, nous ne pouvons pas tous les appliquer, surtout dans le cas d'une longue liste. La prise en compte simultanée des risques d'obsolescence amène rapidement à une explosion combinatoire. Le choix de plusieurs éléments génère des TPC très larges qu'il est difficile de traiter. L'application de cette méthodologie est limitée au choix d'un petit nombre de composants obsolètes avec quelques alternatives possibles. Cependant, une hiérarchisation ou emboîtement des éléments d'un système complexe pourra éviter cette faiblesse.
- La définition de scénarios en est encore à ses débuts. Il est nécessaire d'établir des méthodes structurantes permettant de définir quasi automatiquement des scénarios de conception à tester selon les souhaits des concepteurs.

Enfin, la dernière voie d'exploration concerne le lien entre l'obsolescence et les quatre catégories d'exigences : les exigences fonctionnelles, de qualité, de performance et de contraintes. Nous travaillons actuellement à déterminer les phénomènes qui décrivent la propagation des conséquences de l'obsolescence par la violation d'au moins une des exigences appartenant à ces quatre catégories. Il s'agit d'étudier, par exemple, les liens entre l'obsolescence, la fiabilité ou la maintenabilité. Le champ du maintien en condition opérationnelle des parcs de matériels à longue durée de vie est visé.

Annexes

Annexe 1 : Les matrices DSMs et DMMs d'ERTMS

		Gérer son train	Circuler sur les voies	vérifier les billets de voyageurs	Effectuer de manœuvre exceptionnelle, déblocage du système	Gérer la circulation des trains en sécurité	Assurer le transport des trains	Gérer la circulation des trains en sécurité dans d'autre domaine	Etablir les tables horaires
Les activités opérationnelles	Gérer son train		1						
	Circuler sur les voies					1			
	vérifier les billets de voyageurs		1						
	Effectuer de manœuvre exceptionnelle, déblocage du système					1			
	Gérer la circulation des trains en sécurité	1	1					1	
	Assurer le transport des trains		1						
	Gérer la circulation des trains en sécurité dans d'autre domaine								
	Etablir les tables horaires					1			
Entités / Acteurs opérationnelles	Agent de conduite	1							
	Matériel roulant		1						1
	Agent de service commercial train			1					
	Agent à poste								
	Système de gestion de la circulation des trains en sécurité					1			
	Voie						1		
	Autres Systèmes de signalisation : BAL, BAPR et CCVBS							1	
	Service de planification des horaires								1

FIGURE 6.19 – DMM d'Analyse opérationnelle

	System Functions						Functions of Entities and Actors			
	Initialisation	Libération	Enclenchement et Espacement	Localisation des trains	Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train	autorité de mouvement (MA)	Gérer son train	Circuler sur les voies	Effectuer de manœuvre exceptionnelle, déblocage du	Etablir les tables horaires
Initialisation			1							1
Libération			1							
Enclenchement et Espacement						1				
Localisation des trains		1						1		
Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train								1		
autorité de mouvement (MA)					1		1	1	1	

FIGURE 6.20 – DMM de l'Analyse Système

	Fonction du Système						Composant logique (ArchLog)		
	Initialisation	Libération	Enclenchement et Espacement	Localisation des trains	Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train	autorité de mouvement (MA)	Système de localisation	Système de contrôle	Système de gestion du train
Initialisation			1					1	
Libération			1					1	
Enclenchement et Espacement						1		1	
Localisation des trains		1					1		
Exécuter les ordres et estimer la vitesse du train									1
autorité de mouvement (MA)					1			1	

FIGURE 6.21 – DMM de l'Architecture Logique

Annexe 2 : Les Réseaux Bayésiens d'ERTMS

Réseaux bayésiens des trois premiers niveaux d'ARCADIA

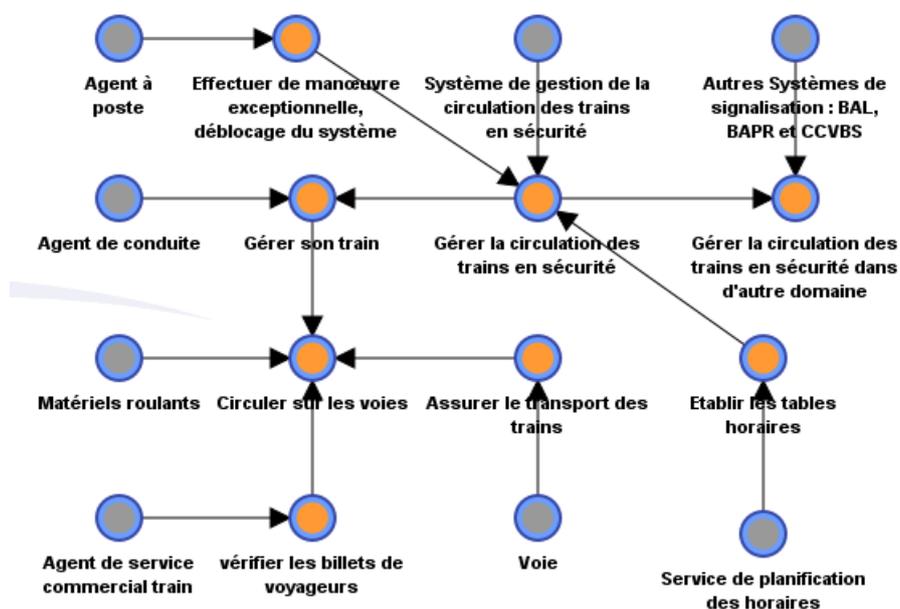


FIGURE 6.23 – RB de l'Analyse Opérationnelle

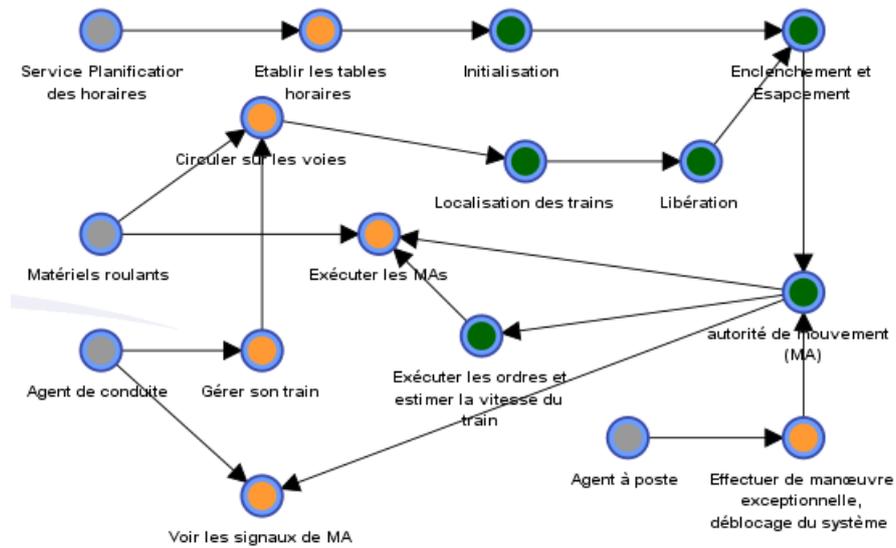


FIGURE 6.24 – RB de l'Analyse Système

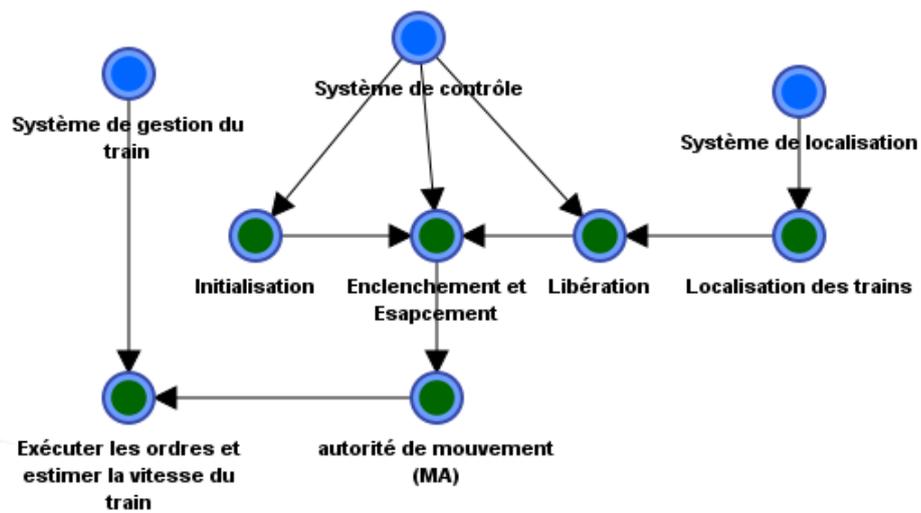


FIGURE 6.25 – RB de l'Analyse Logique

Bibliographie

- [OPCAT2019V4.0] : *OPCATv4.0 OPM*. <http://whhttps://opcat.software.informer.com/>
- [lifewire] *What Is USB 1.1 ?* <https://www.lifewire.com/what-is-usb-1-1-2626036>. – Accessed : 2010-09-30
- [Sebok2020guide 2020] *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK)*. 2020
- [Aggarwal 2013] AGGARWAL, Anupama : *This is how you cite a website in latex*. <http://precog.iiitd.edu.in/people/anupama>. Mai 2013
- [Anderies u. a. 2013] ANDERIES, John M. ; FOLKE, Carl ; WALKER, Brian ; OSTROM, Elinor : Aligning key concepts for global change policy : robustness, resilience, and sustainability. In : *Ecology and society* 18 (2013), Nr. 2
- [Apedome u. a. 2011] APEDOME, Kouami S. ; EL MHAMED, Abderrahman ; ADDOUCHE, Sid-Ali ; BENNOUR, Mézianne : L'intégration du retour d'expérience cognitif à la statistique dans la résolution de problèmes industriels. In : *Proceedings de 9eme Congrès International de Génie Industriel*. Saint Sauveur, Quebec, Canada, Oktober 2011, S. 111. – URL <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00637942>
- [Arcadia 2014] ARCADIA : Introduction to Arcadia. (2014)
- [Artebrant u. a. 2004] ARTEBRANT, Anna ; JÖNSSON, Elna ; NORDHEMMER, Marie : *Risks and Risk Management in the Supply Chain Flow : A Case Study Based on Some of Marsh's Clients*. Univ., 2004
- [Ashayeri und Selen 2005] ASHAYERI, Jalal ; SELEN, Willem : An application of a unified capacity planning system. In : *International Journal of Operations & Production Management* (2005)
- [Baldwin u. a. 2000] BALDWIN, Carliss Y. ; CLARK, Kim B. ; CLARK, Kim B. u. a. : *Design rules : The power of modularity*. Bd. 1. MIT press, 2000
- [Barger u. a. 2009] BARGER, Pavol ; SCHÖN, Walter ; BOUALI, Mohamed : A study of railway ERTMS safety with colored Petri nets. In : *The European Safety and Reliability Conference (ESREL'09)* Bd. 2 Taylor & Francis Group (Veranst.), 2009, S. 1303–1309
- [Bartels u. a. 2012] BARTELS, Bjoern ; ERMEL, Ulrich ; SANDBORN, Peter ; PECHT, Michael G. : *Strategies to the prediction, mitigation and management of product obsolescence*. Bd. 87. John Wiley & Sons, 2012

- [Bartolomei 2007] BARTOLOMEI, Jason E. : Qualitative knowledge construction for engineering systems : extending the design structure matrix methodology in scope and procedure / AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING. 2007. – Forschungsbericht
- [Beamon 1998] BEAMON, Benita M. : Supply chain design and analysis : : Models and methods. In : *International journal of production economics* 55 (1998), Nr. 3, S. 281–294
- [Ben-Gal 2008] BEN-GAL, Irad : Bayesian networks. In : *Encyclopedia of statistics in quality and reliability* 1 (2008)
- [Bennett u. a. 2005] BENNETT, Matthew B. ; RASMUSSEN, Robert D. ; MICHEL, D I. : A Model-Based Requirements Database Tool for Complex Embedded Systems. In : *Proceedings of the INCOSE 2005 International Symposium, Rochester, NY, 2005*
- [Bhamra u. a. 2011] BHAMRA, Ran ; DANI, Samir ; BURNARD, Kevin : Resilience : the concept, a literature review and future directions. In : *International Journal of Production Research* 49 (2011), Nr. 18, S. 5375–5393
- [BMU 2007] BMU, GEFÖRDERT DURCH DAS : STUDIE ZUR ENTWICKLUNG EINES RÜCKNAHME-UND VERWERTUNGSSYSTEM FÜR PHOTOVOLTAISCHE PRODUKTE. (2007)
- [Boas 2008] BOAS, Ryan C. : *Commonality in complex product families : Implications of divergence and lifecycle offsets*, Massachusetts Institute of Technology, Engineering Systems Division, Dissertation, 2008
- [Bonjour u. a. 2013] BONJOUR, Eric ; DENIAUD, Samuel ; MICAËLLI, Jean-Pierre : A method for jointly drawing up the functional and design architectures of complex systems during the preliminary system-definition phase. In : *Journal of Engineering Design* 24 (2013), Nr. 4, S. 305–319
- [Bonjour u. a. 2010] BONJOUR, Eric ; HARMEL, Ghassen ; MICAËLLI, Jean-Pierre ; DULMET, Maryvonne : Simulating change propagation between product architecture and development organisation. In : *International Journal of Mass Customisation* 3 (2010), Nr. 3, S. 288–310
- [Bonnet u. a. 2016] BONNET, Stéphane ; VOIRIN, Jean-Luc ; EXERTIER, Daniel ; NORMAND, Véronique : Not (strictly) relying on sysml for MBSE : language, tooling and development perspectives : The arcadia/capella rationale. In : *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) IEEE* (Veranst.), 2016, S. 1–6
- [Booch u. a. 2000] BOOCH, Grady ; JACOBSON, Ivar ; RUMBAUGH, Jim : OMG unified modeling language specification. In : *Object Management Group ed : Object Management Group* 1034 (2000)
- [Booth 2012] BOOTH, PD : Intermittent and continuous automatic train protection. In : *IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012)* IET (Veranst.), 2012, S. 89–117
- [Börjesson 2012] BÖRJESSON, Fredrik : *Approaches to modularity in product architecture*, KTH Royal Institute of Technology, Dissertation, 2012

- [Bourque u. a. 2014] BOURQUE, Pierre; FAIRLEY, Richard E. u. a. : *Guide to the software engineering body of knowledge (SWEBOK (R)) : Version 3.0.* IEEE Computer Society Press, 2014
- [Bradley und Dawson 1998] BRADLEY, Malcolm; DAWSON, Ray J. : An analysis of obsolescence risk in IT systems. In : *Software Quality Journal* 7 (1998), Nr. 2, S. 123–130
- [Brandon-Jones u. a. 2014] BRANDON-JONES, Emma; SQUIRE, Brian; AUTRY, Chad W.; PETERSEN, Kenneth J. : A contingent resource-based perspective of supply chain resilience and robustness. In : *Journal of Supply Chain Management* 50 (2014), Nr. 3, S. 55–73
- [Brezet und Van Hemel 1997] BREZET, Han; VAN HEMEL, Carolien : Ecodesign. In : *A Promising Approach, United Nations Publication, Paris* (1997)
- [Brown u. a. 1964] BROWN, George W.; LU, John Y.; WOLFSON, Robert J. : Dynamic modeling of inventories subject to obsolescence. In : *Management Science* 11 (1964), Nr. 1, S. 51–63
- [Browning 2015] BROWNING, Tyson R. : Design structure matrix extensions and innovations : a survey and new opportunities. In : *IEEE Transactions on Engineering Management* 63 (2015), Nr. 1, S. 27–52
- [Bruneau und Reinhorn 2004] BRUNEAU, Michel; REINHORN, Andrei : Seismic resilience of communities-conceptualization and operationalization. In : *Proceedings of International workshop on Performance based seismic-design, Bled-Slovenia, June, 2004*
- [Butler und Silver 2009] BUTLER, Matthew P.; SILVER, Rae : Basis of robustness and resilience in the suprachiasmatic nucleus : individual neurons form nodes in circuits that cycle daily. In : *Journal of biological rhythms* 24 (2009), Nr. 5, S. 340–352
- [Calio u. a. 2016] CALIO, Elvira; DI GIORGIO, Fabio; PASQUINELLI, Mauro : Deploying Model-Based Systems Engineering in Thales Alenia Space Italia. In : *CIISE, 2016*, S. 112–118
- [Cantor 2001] CANTOR, Murray : Rup se : The rational unified process for systems engineering. In : *The Rational Edge, Rational Software* (2001)
- [Cantor und Plug 2003] CANTOR, Murray; PLUG, RUP : Rational unified process for systems engineering part 1 : Introducing RUP se version 2.0. In : *The Rational Edge (August 2003)* (2003)
- [CE 2005] CE, Commission E. : le déploiement du système européen de signalisation ferroviaire ERTMS/ETCS,. 2005. – Forschungsbericht
- [CE 2006] CE, Commission E. : Un trafic ferroviaire fluide et sûr : un grand projet industriel européen. 2006. – Forschungsbericht
- [Charles u. a. 2015] CHARLES, Ricardo; DENNERY, Pierre; GUTTIKONDA, Asresh; O’CONNOR, Katie : Supply Chain Risk : A Utility Company Perspective. In : *Massachusetts : Institute of Technology* (2015)
- [Chen u. a. 2020] CHEN, Liang; ZHENG, Yu; XI, Juntong; LI, Shaoyang : An analysis method for change propagation based on product feature network. In : *Research in Engineering Design* 31 (2020), Nr. 4, S. 491–503

- [Chiang u. a. 2001] CHIANG, Wen-Chuan; PENNATHUR, Arunkumar; MITAL, Anil : Designing and manufacturing consumer products for functionality : a literature review of current function definitions and design support tools. In : *Integrated Manufacturing Systems* 12 (2001), Nr. 6, S. 430–448
- [Chien und Su 2003] CHIEN, Te-King; SU, Chao-Ton : Using the QFD concept to resolve customer satisfaction strategy decisions. In : *International Journal of Quality & Reliability Management* 20 (2003), Nr. 3, S. 345–359
- [Chow und Heaver 1999] CHOW, D; HEAVER, T : Logistics strategies for north america. In : *Global Logistics and Distribution Planning : Strategies for Management* (1999), S. 359–374
- [Clark und Fujimoto 1991] CLARK, Kim B.; FUJIMOTO, Takahiro : Product development performance : Strategy, organization, and management in the world auto industry. (1991)
- [Clarkson u. a. 2004] CLARKSON, P J.; SIMONS, Caroline; ECKERT, Claudia : Predicting change propagation in complex design. In : *J. Mech. Des.* 126 (2004), Nr. 5, S. 788–797
- [Clément u. a. 2018] CLÉMENT, Antoine; MARMIER, François; KAMISSOKO, Daouda; GOURC, Didier; WIOLAND, Liên; GOVAERE, Virginie; CEGARRA, Julien : Robustesse, résilience : une brève synthèse des définitions au travers d’une analyse structurée de la littérature. In : *MOSIM’18-12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation*, 2018, S. 8
- [Cobbaert und Van Oudheusden 1996] COBBAERT, Koen; VAN OUDHEUSDEN, Dirk : Inventory models for fast moving spare parts subject to “sudden death” obsolescence. In : *International Journal of Production Economics* 44 (1996), Nr. 3, S. 239–248
- [Cohen u. a. 2000] COHEN, Tal; NAVATHE, Shamkant B.; FULTON, Robert E. : C-FAR, change favorable representation. In : *Computer-aided design* 32 (2000), Nr. 5-6, S. 321–338
- [Conrady und Jouffe 2013] CONRADY, Stefan; JOUFFE, Lionel : Introduction to bayesian networks & bayesialab. In : *Bayesia SAS* (2013)
- [Conrady und Jouffe 2015] CONRADY, Stefan; JOUFFE, Lionel : *Bayesian networks and BayesiaLab : A practical introduction for researchers*. Bayesia USA, 2015
- [Costadoat u. a. 2011] COSTADOAT, R; MATHIEU, L; FALGARONE, H : Design method taking into account geometric variations management along the design process. In : *Global Product Development*. Springer, 2011, S. 159–166
- [Cronbach und Meehl 1955] CRONBACH, Lee J.; MEEHL, Paul E. : Construct validity in psychological tests. In : *Psychological bulletin* 52 (1955), Nr. 4, S. 281
- [Danilovic und Browning 2007] DANILOVIC, Mike; BROWNING, Tyson R. : Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices. In : *International journal of project management* 25 (2007), Nr. 3, S. 300–314
- [Di Maio 2014] DI MAIO, Marco : Model-driven interface management a practical approach to systems engineering in large-scale international research projects. In : *2014 IEEE International Systems Conference Proceedings IEEE* (Veranst.), 2014, S. 383–387
- [Dori 2002] DORI, Dov : *Object-process methodology : a holistic systems paradigm*. Springer, 2002

- [Dragicevic 2016] DRAGICEVIC, Arnaud Z. : From robustness to resilience : A network Price identity approach. In : *Ecological Complexity* 28 (2016), S. 47–53
- [Durmuş u. a. 2012] DURMUŞ, Mustafa S. ; YILDIRIM, Ugur ; SÖYLEMEZ, Mehmet T. : Interlocking system design for ERTMS/ETCS : An approach with batches Petri nets. In : *IFAC Proceedings Volumes* 45 (2012), Nr. 29, S. 110–115
- [Eckert u. a. 2004] ECKERT, Claudia ; CLARKSON, P J. ; ZANKER, Winfried : Change and customisation in complex engineering domains. In : *Research in engineering design* 15 (2004), Nr. 1, S. 1–21
- [Eckert u. a. 2001] ECKERT, CM ; ZANKER, Winfried ; CLARKSON, P J. : Aspects of a better understanding of changes. In : *Proceedings of ICED* Bd. 1, 2001
- [El Hassene u. a. 2014a] EL HASSENE, Ait M. ; RADOUANE, Laggoune ; ALAA, Chateauf : Bayesian networks for the evaluation of complex systems' availability. (2014)
- [El Hassene u. a. 2014b] EL HASSENE, Ait M. ; RADOUANE, Laggoune ; ALAA, Chateauf : Bayesian networks for the evaluation of complex systems' availability. (2014)
- [El Kourssi und Kampmann 2002] EL KOURSI, E ; KAMPMANN, B : Qualitative and quantitative safety assessment of ERTMS Operating rules. In : *WIT Transactions on The Built Environment* 61 (2002)
- [Engel und Browning 2008] ENGEL, Avner ; BROWNING, Tyson R. : Designing systems for adaptability by means of architecture options. In : *Systems Engineering* 11 (2008), Nr. 2, S. 125–146
- [Engel u. a. 2017] ENGEL, Avner ; BROWNING, Tyson R. ; REICH, Yoram : Designing products for adaptability : insights from four industrial cases. In : *Decision Sciences* 48 (2017), Nr. 5, S. 875–917
- [Engel und Reich 2015] ENGEL, Avner ; REICH, Yoram : Advancing architecture options theory : six industrial case studies. In : *Systems Engineering* 18 (2015), Nr. 4, S. 396–414
- [Eppinger u. a. 1994] EPPINGER, Steven D. ; WHITNEY, Daniel E. ; SMITH, Robert P. ; GEBALA, David A. : A model-based method for organizing tasks in product development. In : *Research in engineering design* 6 (1994), Nr. 1, S. 1–13
- [Essabbar u. a. 2014] ESSABBAR, Driss ; ZOLGHADRI, Marc ; ZRIKEM, Maria ; AYADI, Abderrahman : Rule-based modelling of dependencies among activities in collaborative partnership. In : *Journal of Design Research* 9 12 (2014), Nr. 1-2, S. 32–51
- [Estefan 2009] ESTEFAN, Jeff : MBSE methodology survey. In : *Insight* 12 (2009), Nr. 4, S. 16–18
- [Estefan u. a. 2007] ESTEFAN, Jeff A. u. a. : Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies. In : *IncoSE MBSE Focus Group* 25 (2007), Nr. 8, S. 1–12
- [Fargier u. a. 2018] FARGIER, Hélène ; GIMENEZ, Pierre-François ; MENGIN, Jérôme : Recommandation par inférence bayésienne. Application à la configuration de produit. (2018)

- [Feldman und Sandborn 2007] FELDMAN, Kiri ; SANDBORN, Peter : Integrating technology obsolescence considerations into product design planning. In : *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* Bd. 48051, 2007, S. 981–988
- [Fernandez u. a. 2016] FERNANDEZ, Jose L. ; LOPEZ, Juan ; GOMEZ, J P. : Reengineering the avionics of an unmanned aerial vehicle. In : *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 31 (2016), Nr. 4, S. 6–13
- [Field u. a. 2012] FIELD, Christopher B. ; BARROS, Vicente ; STOCKER, Thomas F. ; DAHE, Qin : *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation : special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 2012
- [Fisher 2013] FISHER, Tim : *This is how you cite a website in latex*. <http://precog.iiitd.edu.in/people/anupama>. Mai 2013
- [Galvin 2001] GALVIN, Peter : Product modularity and the contextual factors that determine its use as a strategic tool. (2001)
- [Ganin u. a. 2017] GANIN, Alexander A. ; KITSACK, Maksim ; MARCHESE, Dayton ; KEISLER, Jeffrey M. ; SEAGER, Thomas ; LINKOV, Igor : Resilience and efficiency in transportation networks. In : *Science advances* 3 (2017), Nr. 12, S. e1701079
- [Garmezy 1993] GARMEZY, Norman : Vulnerability and resilience. (1993)
- [Giaccobi 2009] GIACCOBI, Stéphane : *Méthode de conception de multimatériaux à architecture multicouche : application à la conception d'une canalisation sous-marine*, Bordeaux 1, Dissertation, 2009
- [Gibert 1980] GIBERT, Patrick : *Le contrôle de gestion dans les organisations publiques*. Les Editions d'organisation, 1980
- [Giffin u. a. 2009] GIFFIN, Monica ; WECK, Olivier de ; BOUNOVA, Gergana ; KELLER, Rene ; ECKERT, Claudia ; CLARKSON, P J. : Change propagation analysis in complex technical systems. In : *Journal of Mechanical Design* 131 (2009), Nr. 8
- [Glinz 2007] GLINZ, Martin : On non-functional requirements. In : *15th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2007)* IEEE (Veranst.), 2007, S. 21–26
- [Gomaa u. a. 2013] GOMAA, Wael H. ; FAHMY, Aly A. u. a. : A survey of text similarity approaches. In : *International Journal of Computer Applications* 68 (2013), Nr. 13, S. 13–18
- [Gorbea u. a. 2008] GORBEA, Carlos ; SPIELMANNLEITNER, Tobias ; LINDEMANN, Udo ; FRICKE, Ernst : Analysis of hybrid vehicle architectures using multiple domain matrices. In : *DSM 2008 : Proceedings of the 10th International DSM Conference, Stockholm, Sweden, 11.-12.11. 2008*, 2008
- [Gott 1968] GOTT, Samuel : *The divine history of the genesis of the world explicated & illustrated*. London : : Printed by EC & AC for Henry Eversden, and are to be sold at his shop, 1968

- [Granier 2005] GRANIER, Laurent : CJCE (Grande Ch.), 12 juillet 2005, Commission des Communautés européennes c/France, aff. C-304/02. Manquement d'État-Pêche-Obligations de contrôle mises à la charge des États membres Arrêt de la Cour constatant un manquement-Inexécution Article 228 CE-Paiement d'une somme forfaitaire Imposition d'une astreinte. Avec commentaire. In : *Revue Européenne de Droit de l'Environnement* 9 (2005), Nr. 4, S. 449–468
- [Gravier und Swartz 2009] GRAVIER, Michael J. ; SWARTZ, Stephen M. : The dark side of innovation : Exploring obsolescence and supply chain evolution for sustainment-dominated systems. In : *The Journal of High Technology Management Research* 20 (2009), Nr. 2, S. 87–102
- [Greco u. a. 2012] GRECO, Roberto ; DI NARDO, Armando ; SANTONASTASO, G : Resilience and entropy as indices of robustness of water distribution networks. In : *Journal of Hydroinformatics* 14 (2012), Nr. 3, S. 761–771
- [Group 2016] GROUP, Expert : Obsolescence Management Final Report. 2016. – Forschungsbericht. – 1–30 S
- [Hamraz u. a. 2012] HAMRAZ, Bahram ; CALDWELL, Nicholas H. ; JOHN CLARKSON, P : A multidomain engineering change propagation model to support uncertainty reduction and risk management in design. In : *Journal of Mechanical Design* 134 (2012), Nr. 10
- [Hause u. a. 2006] HAUSE, Matthew u. a. : The SysML modelling language. In : *Fifteenth European Systems Engineering Conference* Bd. 9, 2006, S. 1–12
- [Henry und Ramirez-Marquez 2012] HENRY, Devanandham ; RAMIREZ-MARQUEZ, Jose E. : Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time. In : *Reliability Engineering & System Safety* 99 (2012), S. 114–122
- [Herald u. a. 2007] HERALD, T ; VERMA, Dinesh ; LECHLER, Thomas : A model proposal to forecast system baseline evolution due to obsolescence through system operation. In : *Proceedings of 5th Annual Conference on Systems Engineering Research, Hoboken, New Jersey, 2007*, S. 14–16
- [Hernandez und Fernandez-Sanchez 2017] HERNANDEZ, Carlos ; FERNANDEZ-SANCHEZ, Jose L. : Model-based systems engineering to design collaborative robotics applications. In : *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* IEEE (Veranst.), 2017, S. 1–6
- [Holley u. a. 2011] HOLLEY, Vincent ; YANNOU, Bernard ; JANCOVIC, M : Using the ff-dmm matrix to represent functional flow in product architecture. In : *DSM 2011 : Proceedings of the 13th International DSM Conference, 2011*
- [Holling 1973] HOLLING, Crawford S. : Resilience and stability of ecological systems. In : *Annual review of ecology and systematics* 4 (1973), Nr. 1, S. 1–23
- [Hollnagel u. a. 2006] HOLLNAGEL, Erik ; WOODS, David D. ; LEVESON, Nancy : *Resilience engineering : Concepts and precepts*. Ashgate Publishing, Ltd., 2006
- [Hölttä-Otto u. a. 2005] HÖLTTÄ-OTTO, Katja u. a. : *Modular product platform design*. Helsinki University of Technology, 2005

- [Hu und Bidanda 2009] HU, Guiping; BIDANDA, Bopaya : Modeling sustainable product lifecycle decision support systems. In : *International Journal of Production Economics* 122 (2009), Nr. 1, S. 366–375
- [Huang und Mak 1999] HUANG, GQ; MAK, KL : Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries. In : *International Journal of Operations & Production Management* (1999)
- [Ibanez u. a. 2016] IBANEZ, Eduardo; LAVRENZ, Steven; GKRTZA, Konstantina; MEJIA-GIRALDO, Diego A.; KRISHNAN, Venkat; MCCALLEY, James D.; SOMANI, Arun K. : Resilience and robustness in long-term planning of the national energy and transportation system. In : *International Journal of Critical Infrastructures* 12 (2016), Nr. 1-2, S. 82–103
- [Iglesias und Kastner 2013] IGLESIAS, Félix; KASTNER, Wolfgang : Analysis of similarity measures in times series clustering for the discovery of building energy patterns. In : *Energies* 6 (2013), Nr. 2, S. 579–597
- [ISO/IEC 2008] ISO/IEC : *Systems and software engineering—System life cycle processes*. 2008
- [Jabri u. a. 2010] JABRI, Sana; BOURDEAUD’HUY, Thomas; LEMAIRE, Etienne u. a. : European railway traffic management system validation using UML/Petri nets modelling strategy. In : *European Transport Research Review* 2 (2010), Nr. 2, S. 113–128
- [Janin 2000] JANIN, Marc : *Démarche d’éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus*, Dissertation, 2000
- [Jarratt u. a. 2003] JARRATT, TAW; ECKERT, Claudia; WEEKS, R; CLARKSON, PJ : Environmental legislation as a driver of design. (2003)
- [Jarratt u. a. 2002] JARRATT, TAWA; ECKERT, C; CLARKSON, PJ; SCHWANKL, L u. a. : Product architecture and the propagation of engineering change. In : *DS 30 : Proceedings of DESIGN 2002, the 7th International Design Conference, Dubrovnik, 2002*, S. 75–80
- [Jennings u. a. 2016] JENNINGS, Connor; WU, Dazhong; TERPENNY, Janis : Forecasting obsolescence risk and product life cycle with machine learning. In : *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 6 (2016), Nr. 9, S. 1428–1439
- [Jensen 1996] JENSEN, VF : Introduction to Bayesian Networks [U+2016] Springer-Verlag New York. In : *Inc. Secaucus, NJ, USA* (1996)
- [Jordan u. a. 1999] JORDAN, Michael I.; GHAHRAMANI, Zoubin; JAAKKOLA, Tommi S.; SAUL, Lawrence K. : *An introduction to variational methods for graphical models, Learning in graphical models*. 1999
- [Josias u. a. 2004] JOSIAS, Craig; TERPENNY, Janis P.; MCLEAN, Kenneth J. : Component obsolescence risk assessment. In : *IIE Annual Conference. Proceedings* Citeseer (Veranst.), 2004, S. 1
- [Kamarudin 2017] KAMARUDIN, Khairul M. : *Development of Integrated Systematic Approach Conceptual Design and TRIZ using Safety Principles in Embodiment Design for Complex Products*, University of Sheffield, Dissertation, 2017

- [Karban u. a. 2016] KARBAN, Robert ; DEKENS, Frank G. ; HERZIG, Sebastian ; ELAASAR, Maged ; JANKEVIČIUS, Nerijus : Creating system engineering products with executable models in a model-based engineering environment. In : *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VI* Bd. 9911 International Society for Optics and Photonics (Veranst.), 2016, S. 99110B
- [Karniel und Reich 2009] KARNIEL, Arie ; REICH, Yoram : From DSM-based planning to design process simulation : a review of process scheme logic verification issues. In : *IEEE Transactions on Engineering Management* 56 (2009), Nr. 4, S. 636–649
- [Kaufman und Woodhead 2006] KAUFMAN, J J. ; WOODHEAD, Roy : *Stimulating innovation in products and services*. Wiley Online Library, 2006
- [Kechaou 2020] KECHAOU, Fatma : *Construction d'un système d'aide à la décision statistico-cognitive pour le pilotage des processus d'entreprise*, Dissertation, 2020. – URL <http://www.theses.fr/2020UPAST055>. – Thèse de doctorat dirigée par Zolghadri, Marc Ingénierie des systèmes complexes université Paris-Saclay
- [Kechaou u. a. 2020] KECHAOU, Fatma ; ADDOUCHE, Sid-Ali ; ZOLGHADRI, Marc : Cause-effect diagrams transformation to bayesian networks : construction and elicitation rules. In : *International Tools and Methods of Competitive Engineering Symposium*, 2020, S. 11–15
- [Kemp-Benedict 2008] KEMP-BENEDICT, Eric : Elicitation techniques for Bayesian network models. In : *Forthcoming SEI Working Paper*. Citeseer, 2008
- [Klein u. a. 2003] KLEIN, Richard J. ; NICHOLLS, Robert J. ; THOMALLA, Frank : Resilience to natural hazards : How useful is this concept ? In : *Global environmental change part B : environmental hazards* 5 (2003), Nr. 1, S. 35–45
- [Koh u. a. 2012] KOH, Edwin C. ; CALDWELL, Nicholas H. ; CLARKSON, P J. : A method to assess the effects of engineering change propagation. In : *Research in Engineering Design* 23 (2012), Nr. 4, S. 329–351
- [Kousri 2016] KOUSRI, Mohamed R. : *Développement et Évaluation d'un Outil d'Analyse Dimensionné pour les Problématiques de Compatibilité Electromagnétique Propres au Milieu Ferroviaire*, Université de Lille 1, Dissertation, 2016
- [Krstić u. a. 2015] KRSTIĆ, Milan ; SKORUP, Ana ; MILOSAVLJEVIĆ, Bojan : Unique concept of standardization, modularization and customization of products as a strategy of e-business. In : *International Review* (2015), Nr. 1-2, S. 74–82
- [Kruchten 2004] KRUCHTEN, Philippe : *The rational unified process : an introduction*. Addison-Wesley Professional, 2004
- [Kumbhar 2018] KUMBHAR, KN : Brainstorming technique : innovative quality management tool for library. In : *Current Trends in Library Management* (2018)
- [Kwisthout 2011] KWISTHOUT, Johan : Most probable explanations in Bayesian networks : Complexity and tractability. In : *International Journal of Approximate Reasoning* 52 (2011), Nr. 9, S. 1452–1469
- [Langlois 2002] LANGLOIS, Richard N. : Modularity in technology and organization. In : *Journal of economic behavior & organization* 49 (2002), Nr. 1, S. 19–37

- [Langseth und Portinale 2007] LANGSETH, Helge ; PORTINALE, Luigi : Bayesian networks in reliability. In : *Reliability Engineering & System Safety* 92 (2007), Nr. 1, S. 92–108
- [Laroche und Guihéry 2013] LAROCHE, Florent ; GUIHÉRY, Laurent : European Rail Traffic Management System (ERTMS) : supporting competition on the European rail network ? In : *Research in Transportation Business & Management* 6 (2013), S. 81–87
- [Lees-Miller u. a. 2010] LEES-MILLER, John ; HAMMERSLEY, John ; WILSON, R : Theoretical maximum capacity as benchmark for empty vehicle redistribution in personal rapid transit. In : *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* (2010), Nr. 2146, S. 76–83
- [Li u. a. 2019] LI, Yuliang ; ZHAO, Wei ; ZHANG, Jie : Resource-constrained scheduling of design changes based on simulation of change propagation process in the complex engineering design. In : *Research in Engineering Design* 30 (2019), Nr. 1, S. 21–40
- [Lowe und Ridgway 2000] LOWE, Anthony ; RIDGWAY, Keith : UK user's guide to quality function deployment. In : *Engineering Management Journal* 10 (2000), Nr. 3, S. 147–155
- [Manyena 2006] MANYENA, Siambabala B. : The concept of resilience revisited. In : *Disasters* 30 (2006), Nr. 4, S. 434–450
- [Marija u. a. 2017] MARIJA, Bocquet Jean-Claude J. u. a. : *Innover en Concevant des Systèmes et Services Favorisant la Création de Valeur : Proposition d'une Approche de Conception Pilotée par la Valeur en Phases Amont de Conception*, Paris Saclay, Dissertation, 2017
- [Martinson 2017] MARTINSON, Ryan : Resilience in a Transportation System : A Whole System Approach. In : *Transportation Research Circular* (2017), Nr. E-C226
- [Masmoudi u. a. 2020] MASMOUDI, Mahmoud ; ZOLGHADRI, Marc ; LECLAIRE, Patrice : A posteriori identification of dependencies between continuous variables for the engineering change management. In : *Research in Engineering Design* (2020), S. 1–18
- [Masters 1991] MASTERS, James M. : A note on the effect of sudden obsolescence on the optimal lot size. In : *Decision Sciences* 22 (1991), Nr. 5, S. 1180–1186
- [Mazeika u. a. 2016] MAZEIKA, Donatas ; MORKEVICIUS, Aurelijus ; ALEKSANDRAVICIENE, Aiste : MBSE driven approach for defining problem domain. In : *2016 11th System of Systems Engineering Conference (SoSE) IEEE* (Veranst.), 2016, S. 1–6
- [McDonald 2006] MCDONALD, N : Organisational resilience and industrial risk. Hollnagel, E., DD Woods, N. Leveson, eds. *Resilience Engineering : Concepts and Precepts*. In : *Hampshire : Ashgate* (2006), S. 155–179
- [Meahl 2016] MEAHL, Bill : *Insight on : risks and resilience*. Bd. 44. 2016
- [Meng u. a. 2014] MENG, Xiaozhou ; THÖRNBERG, Benny ; OLSSON, Leif : Strategic proactive obsolescence management model. In : *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 4 (2014), Nr. 6, S. 1099–1108
- [Merola 2006] MEROLA, Leigh : The COTS software obsolescence threat. In : *Fifth International Conference on Commercial-off-the-Shelf (COTS)-Based Software Systems (ICCBSS'05) IEEE* (Veranst.), 2006, S. 7–pp

- [Miller und Elgard 1998] MILLER, Thomas D. ; ELGARD, Per : Defining modules, modularity and modularization. In : *Proceedings of the 13th IPS research seminar, Fuglsoe* Citeseer (Veranst.), 1998
- [Mkrtchyan u. a. 2016] MKRTCHYAN, Lusine ; PODOFILLINI, Luca ; DANG, Vinh N. : Methods for building conditional probability tables of Bayesian belief networks from limited judgment : An evaluation for human reliability application. In : *Reliability Engineering & System Safety* 151 (2016), S. 93–112
- [Mrad 2015] MRAD, Ali B. : *Observations probabilistes dans les réseaux bayésiens*, Dissertation, 2015
- [Mrad u. a. 2014] MRAD, Ali B. ; DELCROIX, Véronique ; PIECHOWIAK, Sylvain ; LEICESTER, Philip : From information to evidence in a bayesian network. In : *European Workshop on Probabilistic Graphical Models* Springer (Veranst.), 2014, S. 33–48
- [Mrad u. a. 2015] MRAD, Ali B. ; DELCROIX, Véronique ; PIECHOWIAK, Sylvain ; LEICESTER, Philip ; ABID, Mohamed : An explication of uncertain evidence in Bayesian networks : likelihood evidence and probabilistic evidence. In : *Applied Intelligence* 43 (2015), Nr. 4, S. 802–824
- [Mulholland 2017] MULHOLLAND, KM : *The resilience of asset systems to the operational risk of obsolescence : using fuzzy logic to quantify risk profiles*, UCL (University College London), Dissertation, 2017
- [Mumby u. a. 2014] MUMBY, Peter J. ; CHOLLETT, Iliana ; BOZEC, Yves-Marie ; WOLFF, Nicholas H. : Ecological resilience, robustness and vulnerability : how do these concepts benefit ecosystem management ? In : *Current Opinion in Environmental Sustainability* 7 (2014), S. 22–27
- [Nelson III und Sandborn 2012] NELSON III, Raymond S. ; SANDBORN, Peter : Strategic management of component obsolescence using constraint-driven design refresh planning. In : *International Journal of Product Lifecycle Management* 6 (2012), Nr. 2, S. 99–120
- [Office 2016] OFFICE, Defense Standardization P. : *SD-22 DMSMS, A Guidebook of Best Practices, Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages (DMSMS)*. 2016
- [OMG 2006] OMG, Business Process Modeling N. : Version 1.0. In : *OMG Final Adopted Specification, Object Management Group* 190 (2006)
- [Ortal und Edahiro 2020] ORTAL, Patricia ; EDAHIRO, Masato : Similarity Measure for Product Attribute Estimation. In : *IEEE Access* 8 (2020), S. 179073–179082
- [Pearl 1988] PEARL, Judea : Markov and Bayesian networks. In : *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems : Networks of Plausible Inference* 1 (1988)
- [Pearl 2014] PEARL, Judea : *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Elsevier, 2014
- [Pitchforth und Mengersen 2013] PITCHFORTH, Jegar ; MENGERSEN, Kerrie : A proposed validation framework for expert elicited Bayesian Networks. In : *Expert Systems with Applications* 40 (2013), Nr. 1, S. 162–167

- [Pollino und Henderson 2010] POLLINO, CA; HENDERSON, C : Bayesian networks : A guide for their application in natural resource management and policy. In : *Landscape Logic, Technical Report 14* (2010)
- [Pollino u. a. 2007] POLLINO, Carmel A.; WOODBERRY, Owen; NICHOLSON, Ann; KORB, Kevin; HART, Barry T. : Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment. In : *Environmental Modelling & Software* 22 (2007), Nr. 8, S. 1140–1152
- [Prostova u. a. 2015] PROSTOVA, Maria A.; GMYL, Anatoly P.; BAKHMUTOV, Denis V.; SHISHOVA, Anna A.; KHITRINA, Elena V.; KOLESNIKOVA, Marina S.; SEREBRYAKOVA, Marina V.; ISAEVA, Olga V.; AGOL, Vadim I. : Mutational robustness and resilience of a replicative cis-element of RNA virus : promiscuity, limitations, relevance. In : *RNA biology* 12 (2015), Nr. 12, S. 1338–1354
- [PUBS 1993] PUBS, FIPS : Announcing the standard for integration definition for function modeling (idef0). In : *Draft Federal Information Processing Standards Publication* 183 (1993)
- [QTEC 2016] QTEC : *QStar Introduction*. <http://QTEC.us>. 2016
- [Ramos u. a. 2011] RAMOS, Ana L.; FERREIRA, José V.; BARCELÓ, Jaume : Model-based systems engineering : An emerging approach for modern systems. In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 42 (2011), Nr. 1, S. 101–111
- [Read 2005] READ, Dwight : Some observations on resilience and robustness in human systems. In : *Cybernetics and Systems : An International Journal* 36 (2005), Nr. 8, S. 773–802
- [Rochet 2007] ROCHET, Samuel : *Formalisation des processus de l'Ingénierie Système : Proposition d'une méthode d'adaptation des processus génériques à différents contextes d'application*, Dissertation, 2007
- [Rodenacker 1971] RODENACKER, W : *Methodological design*. 1971
- [Rojo u. a. 2012] ROJO, FJ R.; ROY, Rajkumar; KELLY, S : Obsolescence risk assessment process best practice. In : *Journal of physics : conference series* Bd. 364 IOP Publishing (Veranst.), 2012, S. 012095
- [Romero Rojo 2011] ROMERO ROJO, Francisco J. : Development of a framework for obsolescence resolution cost estimation. (2011)
- [Roques 2017] ROQUES, P. : *Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method : A Practical Guide to Capella*. Elsevier Science, 2017. – URL <https://books.google.fr/books?id=Qj3jCwAAQBAJ>. – ISBN 9780081017920
- [Roques 2016] ROQUES, Pascal : *MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool*, 2016
- [Russel 2010] RUSSEL, S : *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Stuart J. Russell and Peter Norvig. 2010

- [Sage und Rouse 1999] SAGE, Andrew P.; ROUSE, William B. : An introduction to systems engineering and systems management. In : *Handbook of systems engineering and management 2* (1999)
- [Sanchez u. a. 2020] SANCHEZ, Felipe; BONJOUR, Eric; MICAELLI, Jean-Pierre; MONTICOLO, Davy : An approach based on bayesian network for improving project management maturity : An application to reduce cost overrun risks in engineering projects. In : *Computers in Industry* 119 (2020), S. 103227
- [Sandborn 2007] SANDBORN, Peter : Software obsolescence-Complicating the part and technology obsolescence management problem. In : *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 30 (2007), Nr. 4, S. 886–888
- [Sandborn 2008a] SANDBORN, Peter : Strategic management of DMSMS in systems. In : *DSP Journal* (2008), S. 24–30
- [Sandborn 2008b] SANDBORN, Peter : Trapped on technology's edge. In : *iEEE SpEctrum* 45 (2008), Nr. 4, S. 42–58
- [SD-22 2016] SD-22 : *Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages (DMSMS), A Guide-book of Best Practices for Implementing a Robust DMSMS*. 2016
- [Semmes 2007] SEMMES, Edmund : Cross Cutting Structural Design for Exploration Systems. In : *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007*, S. 1195
- [Seuren u. a. 2018] SEUREN, Tim; TAN, Tarkan; VERMEULEN, Ben; ROSIERSE, Rene; MARINE, RH; DRAIJER, Jan W.; NAVY, Royal N. : *From reactive to proactive obsolescence management*, Master thesis, Eindhoven university. Retrieved from <https://pure.tue.nl/ws...>, Dissertation, 2018
- [Shortell 2015] SHORTELL, Thomas M. : *INCOSE Systems Engineering Handbook : A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. John Wiley & Sons, 2015
- [Siemens 2016] SIEMENS : *Trainguard Trackside equipment*, 2016
- [Singh und Sandborn 2006] SINGH, Pameet; SANDBORN, Peter : Obsolescence driven design refresh planning for sustainment-dominated systems. In : *The Engineering Economist* 51 (2006), Nr. 2, S. 115–139
- [Singh u. a. 2004] SINGH, Pameet; SANDBORN, Peter; GEISER, Todd; LORENSON, David : Electronic part obsolescence driven product redesign planning. In : *International Journal of Advanced Manufacturing Systems* 7 (2004), Nr. 2
- [Sobol und Dori 2020] SOBOL, Gil; DORI, Dov : Improving OPM Conceptual Models by Incorporating Design Structure Matrix. In : *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* IEEE (Veranst.), 2020, S. 1–8
- [Solomon u. a. 2000] SOLOMON, Rajeev; SANDBORN, Peter A.; PECHT, Michael G. : Electronic part life cycle concepts and obsolescence forecasting. In : *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 23 (2000), Nr. 4, S. 707–717
- [Soltan u. a. 2019] SOLTAN, Amel; ADDOUCHE, Sid-Ali; ZOLGHADRI, Marc; BARKALLAH, Maher; HADDAR, Mohamed : System Engineering for dependency analysis-a Bayesian approach : application to obsolescence study. In : *Procedia CIRP* 84 (2019), S. 774–782

- [Specification 2007] SPECIFICATION, OMG A. : Omg unified modeling language (omg uml), superstructure, v2. 1.2. In : *Object Management Group 70* (2007)
- [Steward 1981] STEWARD, Donald V. : *Systems analysis and management : structure, strategy, and design*. Petrocelli books, 1981
- [Stich 2004] STICH, Timo : *Bayesian networks and structure learning*, Diploma Thesis, Computer Science and Engineering, University of Mannheim . . . , Dissertation, 2004
- [Stogdill 1999] STOGDILL, Ronald C. : Dealing with obsolete parts. In : *IEEE Design & Test of Computers* 16 (1999), Nr. 2, S. 17–25
- [Sturges u. a. 1996] STURGES, Robert H. ; O'SHAUGHNESSY, Kathleen ; KILANI, Mohammed I. : Computational model for conceptual design based on extended function logic. In : *AI EDAM* 10 (1996), Nr. 4, S. 255–274
- [Thompson u. a. 1995] THOMPSON, Della ; FOWLER, Henry W. ; FOWLER, Francis G. : *The Concise Oxford Dictionary of Current English : The Foremost Authority on Current English*. Clarendon Press, 1995
- [Tien und Berg 2003] TIEN, James M. ; BERG, Daniel : A case for service systems engineering. In : *Journal of systems science and systems engineering* 12 (2003), Nr. 1, S. 13–38
- [Tomczykowski 2003] TOMCZYKOWSKI, Walter J. : A study on component obsolescence mitigation strategies and their impact on R&M. In : *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003*. IEEE (Veranst.), 2003, S. 332–338
- [Tomlin 2006] TOMLIN, Brian : On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks. In : *Management science* 52 (2006), Nr. 5, S. 639–657
- [Trabelsi u. a. 2020] TRABELSI, Imen ; ZOLGHADRI, Marc ; ZEDDINI, Besma ; BARKALLAH, Maher ; HADDAR, Mohamed : FMECA-based risk assessment approach for proactive obsolescence management. In : *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* Springer (Veranst.), 2020, S. 215–226
- [Tulupyev und Nikolenko 2005a] TULUPYEV, Alexander L. ; NIKOLENKO, Sergey I. : Directed Cycles in Bayesian Belief Networks : Probabilistic Semantics and Consistency Checking Complexity. In : GELBUKH, Alexander (Hrsg.) ; ALBORNOZ, Álvaro de (Hrsg.) ; TERASHIMA-MARÍN, Hugo (Hrsg.) : *MICAI 2005 : Advances in Artificial Intelligence*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 214–223. – ISBN 978-3-540-31653-4
- [Tulupyev und Nikolenko 2005b] TULUPYEV, Alexander L. ; NIKOLENKO, Sergey I. : Directed cycles in Bayesian belief networks : probabilistic semantics and consistency checking complexity. In : *Mexican International Conference on Artificial Intelligence* Springer (Veranst.), 2005, S. 214–223
- [Turki 2008] TURKI, Skander : *Ingénierie système guidée par les modèles : Application du standard IEEE 15288, de l'architecture MDA et du langage SysML à la conception des systèmes mécatroniques*, Dissertation, 2008
- [Ullah u. a. 2016] ULLAH, Inayat ; TANG, Dunbing ; YIN, Leilei : Engineering product and process design changes : a literature overview. In : *Procedia CIRP* 56 (2016), S. 25–33

- [Ulrich 1995] ULRICH, Karl : The role of product architecture in the manufacturing firm. In : *Research policy* 24 (1995), Nr. 3, S. 419–440
- [Ulrich 2003] ULRICH, Karl T. : *Product design and development*. Tata McGraw-Hill Education, 2003
- [Ulrich 1992] ULRICH, KT : The role of product architecture in the manufacturing firm / working paper 3483-92-MSA, Sloan School of Management, MIT, Cambridge, MA. 1992. – Forschungsbericht
- [Urruty u. a. 2016] URRUTY, Nicolas ; TAILLIEZ-LEFEBVRE, Delphine ; HUYGHE, Christian : Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. In : *Agronomy for sustainable development* 36 (2016), Nr. 1, S. 15
- [Valtorta u. a. 2002] VALTORTA, Marco ; KIM, Young-Gyun ; VOMLEL, Jiří : Soft evidential update for probabilistic multiagent systems. In : *International Journal of Approximate Reasoning* 29 (2002), Nr. 1, S. 71–106
- [Van Jaarsveld und Dekker 2011] VAN JAARSVELD, Willem ; DEKKER, Rommert : Estimating obsolescence risk from demand data to enhance inventory control—A case study. In : *International Journal of Production Economics* 133 (2011), Nr. 1, S. 423–431
- [Varis 1997] VARIS, Olli : Bayesian decision analysis for environmental and resource management. In : *Environmental Modelling & Software* 12 (1997), Nr. 2-3, S. 177–185
- [Voinin 2017] VOIRIN, Jean-Luc : *Model-based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method*. Elsevier, 2017
- [Voinin u. a. 2016] VOIRIN, Jean-Luc ; BONNET, Stéphane ; EXERTIER, Daniel ; NORMAND, Véronique : Simplifying (and enriching) SysML to perform functional analysis and model instances. In : *INCOSE International Symposium* Bd. 26 Wiley Online Library (Veranst.), 2016, S. 253–268
- [Voinin 2010] VOIRIN, JL : Method & tools to secure and support collaborative architecting of constrained systems. In : *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2010, S. 19–24
- [Vosgien 2015] VOSGIEN, Thomas : *Model-based system engineering enabling design-analysis data integration in digital design environments : application to collaborative aeronautics simulation-based design process and turbojet integration studies*, Ecole Centrale Paris, Dissertation, 2015
- [Wagner u. a. 2012] WAGNER, David A. ; BENNETT, Matthew B. ; KARBAN, Robert ; ROUQUETTE, Nicolas ; JENKINS, Steven ; INGHAM, Michel : An ontology for State Analysis : Formalizing the mapping to SysML. In : *2012 IEEE Aerospace Conference* IEEE (Veranst.), 2012, S. 1–16
- [Walden u. a. 2015] WALDEN, David D. ; ROEDLER, Garry J. ; FORSBURG, Kevin ; HAMELIN, R D. ; SHORTELL, Thomas M. : *Systems engineering handbook : A guide for system life cycle processes and activities*. John Wiley & Sons, 2015
- [Waldman 1996] WALDMAN, Michael : Planned obsolescence and the R&D decision. In : *The RAND journal of Economics* (1996), S. 583–595

- [Warmington 1974] WARMINGTON, Allan : Obsolescence as an organizational phenomenon. In : *Journal of Management Studies* 11 (1974), Nr. 2, S. 96–114
- [Wazed u. a. 2008] WAZED, MA ; AHMED, Shamsuddin ; YUSOFF, Nukman : Commonality models in manufacturing resources planning : State-of-the-art and future directions. In : *European Journal of Scientific Research* 23 (2008), Nr. 3, S. 421–435
- [Weber u. a. 2002] WEBER, Frithjof ; WUNRAM, Michael ; KEMP, Jeroen ; PUDLATZ, Marc ; BREDEHORST, Bernd : Standardisation in knowledge management—towards a common KM framework in Europe. In : *Proceedings of UNICOM Seminar “Towards Common Approaches & Standards in KM* Bd. 27, 2002
- [Weilkiens 2015] WEILKIENS, T : SYSMOD-The Systems Modeling Toolbox. In : *MBSE4U-Tim Weilkiens* (2015)
- [Weilkiens u. a. 2016] WEILKIENS, T ; SCHEITHAUER, A ; DI MAIO, M ; KLUSMANN, N : Evaluating and comparing MBSE methodologies for practitioners. In : *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* IEEE (Veranst.), 2016, S. 1–8
- [Welch und Dixon 1994] WELCH, Richard V. ; DIXON, John R. : Guiding conceptual design through behavioral reasoning. In : *Research in Engineering Design* 6 (1994), Nr. 3, S. 169–188
- [Werner und Smith 2001] WERNER, Emmy E. ; SMITH, Ruth S. : *Journeys from childhood to midlife : Risk, resilience, and recovery*. Cornell University Press, 2001
- [Whitley 2001] WHITLEY, Jeff A. : A Study of Computer Obsolescence and Its Impact. (2001)
- [Wickenberg u. a. 2011] WICKENBERG, Jan ; STAMLIN, Robert ; PERSSON, Magnus ; BÖRJESSON, Sofia : Challenges for increasing component commonality in platforms. In : *Proceedings of the 5th European Conference on Management of Technology, EuroMOT2011, September 18-20, 2011, Tampere, Finland*, 2011, S. 463–472
- [Wilkinson 2015] WILKINSON, Chris : Obsolescence and life cycle management for avionics. 2015. – Forschungsbericht
- [Wybo 2008] WYBO, Jean-Luc : The role of simulation exercises in the assessment of robustness and resilience of private or public organizations. In : *Resilience of Cities to Terrorist and other Threats*. Springer, 2008, S. 491–507
- [Yassine u. a. 2000] YASSINE, Ali A. ; WHITNEY, Daniel E. ; LAVINE, Jerry ; ZAMBITO, Tony : Do-it-right-first-time (DRFT) approach to design structure matrix (DSM) restructuring. In : *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* Bd. 35142 American Society of Mechanical Engineers (Veranst.), 2000, S. 41–48
- [Yassine und Wissmann 2007] YASSINE, Ali A. ; WISSMANN, Luke A. : The implications of product architecture on the firm. In : *Systems Engineering* 10 (2007), Nr. 2, S. 118–137
- [Zehtaban und Roller 2012] ZEHTABAN, L ; ROLLER, D : Systematic functional analysis methods for design retrieval and documentation. In : *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) (Veranst.), 2012, S. 1094

-
- [Zheng u. a. 2014] ZHENG, Liyu ; SANDBORN, Peter ; TERPENNY, Janis P. ; ORFI, Nihal : An ontological model and method for obsolescence resolution and management. In : *24th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2014* DEStech Publications Inc. (Veranst.), 2014, S. 185–192
- [Zheng u. a. 2015] ZHENG, Liyu ; TERPENNY, Janis ; SANDBORN, Peter : Design refresh planning models for managing obsolescence. In : *IIE Transactions* 47 (2015), Nr. 12, S. 1407–1423
- [Zhu und Basar 2015] ZHU, Quanyan ; BASAR, Tamer : Game-theoretic methods for robustness, security, and resilience of cyberphysical control systems : games-in-games principle for optimal cross-layer resilient control systems. In : *IEEE Control Systems Magazine* 35 (2015), Nr. 1, S. 46–65
- [Zolghadri u. a. 2018] ZOLGHADRI, Marc ; ADDOUCHE, Sid-Ali ; BOISSIE, Kevin ; RICHARD, Daniel : Obsolescence prediction : a Bayesian model. In : *Procedia CIRP* 70 (2018), S. 392–397
- [Zolghadri u. a. 2020] ZOLGHADRI, Marc ; VINGERHOEDS, Rob ; BARON, Claude ; SALA, Sophias : Analysing the impacts of system obsolescence based on system architecture models. In : *TMCE*, 2020