

Le développement de produits multidisciplinaires à l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire

par

Julia GUÉRINEAU

THESE PRÉSENTÉE EN COTUTELLE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE ET A L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GENIE
Ph. D.
ET DU GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE
DE COMPIÈGNE

MONTREAL, LE 10 DECEMBRE 2021

ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Julia Guérineau, 2021



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis RIVEST, directeur de thèse
Professeur, Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Matthieu BRICOGNE, codirecteur de thèse
Enseignant chercheur, Département d'ingénierie mécanique à l'Université de technologie de Compiègne

M. Yvan BEAUREGARD, président du jury
Professeur, Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Zohra CHERFI BOULANGER, examinateur externe
Professeure des Universités, Département d'ingénierie mécanique à l'Université de technologie de Compiègne

M. Clément FORTIN, examinateur externe
Professeur et Doyen des études, Skolkovo Institute of Science and Technology de Moscou

M. Christophe MERLO, examinateur externe
Professeur, ESTIA-Recherche, ESTIA Institute of technology

Mme Nadège TROUSSIER, examinateur externe
Professeure des Universités, Université de technologie de Troyes

M. Bertrand ROSE, examinateur externe indépendant
Professeur des Universités, Département de génie industriel à l'Université de Strasbourg

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 7 DECEMBRE 2021

A L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été l'occasion pour moi de découvrir le monde de la recherche académique des deux côtés de l'Atlantique, de « faire de la science » pour reprendre les mots de mes directeurs, mais elle a également été pour moi l'occasion de me réaliser personnellement. Au-delà de la transition des entreprises que nous avons étudiées, c'est une transition personnelle qui a été entamée en parallèle, et qui m'amène aujourd'hui à vous présenter les travaux de la jeune chercheuse que je suis (malgré mes presque 30 ans et mes quelques cheveux blancs acquis avec la thèse). Cette mise en contexte étant faite, les personnes que je remercie par la suite ont été de précieux allié-e-s sur ces deux volets, que je ne peux dissocier.

Une thèse est un effort beaucoup plus collectif qu'il n'y paraît. Mes toutes premières pensées vont à ma grand-mère maternelle, Mamour de son surnom, qui a été un soutien sans faille, un soutien moral important tout au long de cette thèse, et qui l'a vécue avec moi telle une supporter au stade de France (ou au centre Bell). J'ai pu partager avec elle mes bons, comme mes mauvais moments, et, au moment que j'écris ces quelques lignes, elle partage avec moi cette impatience d'une thèse soutenue.

Cette impatience, je pense aussi la retrouver chez mes directeurs, Matthieu et Louis, que je remercie tout naturellement. Matthieu, merci de m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse, ce « projet personnel », comme tu me l'avais présenté quelques heures après ma soutenance de TN10 –stage de fin d'études. Merci d'avoir suscité et intéressé ma curiosité sur le développement de produits multidisciplinaires. Merci pour ta confiance, et m'avoir offert l'opportunité de réaliser avec toi, puis de présenter deux cours et deux TD sur l'ingénierie système, aujourd'hui faisant partie de TN29. Je sais ô combien cette opportunité est rare pour les doctorants. Louis, merci d'avoir rendu cette cotutelle possible et pour ton accueil chaleureux au Québec, mais également merci pour ton soutien tout au long de cette thèse, et tout particulièrement au cours de la dernière année. Merci d'avoir été, avec Marie, cette seconde famille, et un moteur de mon intégration ici au Québec (ma connaissance des jurons

VI

québécois, je te la dois à toi et une imprimante capricieuse). Merci à vous deux pour votre confiance, vos conseils, votre compréhension, votre ouverture d'esprit ; sans vous ce projet n'aurait pas été réalisable et n'aurait pas été mené à terme. Merci de m'avoir inculqué cette rigueur en recherche, cette précision du choix du mot, de m'avoir partagé votre goût de la recherche, et de m'avoir donné l'opportunité de présenter mes travaux dans diverses conférences. C'est une fierté pour moi de vous avoir eu comme directeurs et d'avoir collaboré avec vous au cours de ces 5 dernières années. Je me tourne vers l'avenir avec confiance.

De par la cotutelle, j'ai également voyagé entre deux équipes de recherche, et je tiens à remercier chacune d'entre elles. Je tiens à remercier mes collègues et ami-e-s des deux côtés de l'Atlantique. Je remercie mes collègues du I101, Fabien et Emeric, pour nos échanges devant la machine à café et votre bonne humeur, mais aussi Cuong, Chen, Marina, et Christophe que j'ai retrouvé par le plus grand des non-hasards au Québec. Au sein du LIPPS comment ne pas te remercier Morty, mon ami, pour ta bonne humeur communicative. Merci également à Lorena et aux plus récents arrivés, Hamidreza et Jérémy, à qui je souhaite une excellente poursuite de leurs travaux.

Au sein de l'équipe de l'UTC, merci à toi Benoît pour m'avoir fait confiance et permis d'enseigner l'ingénierie système aux étudiants de master, participer à RobAFIS deux années de suite, ainsi que de m'avoir permis d'assister à de nombreux événements en lien avec mes travaux, je pense notamment aux SIG sur la mécatronique, ou les systèmes cyber-physiques. Dans la même lignée, merci à toi Julien, pour m'avoir donné l'opportunité de présenter un cours sur l'Internet des Objets au sein de TN21. Merci à toi Alexandre, d'avoir apporté un éclairage complémentaire sur mes travaux à travers ton co-encadrement. Plus généralement, je souhaiterais remercier l'équipe SIPP mais également Philippe, Laurent, Erwan du département d'ingénierie mécanique, Jérémy du SAPC, et Harvey de DeltaCAD dont plusieurs ont partagé leurs connaissances et leur intérêt pour la robotique, l'électronique, l'ingénierie logicielle, ou encore la mécatronique, ce qui m'a permis d'avoir une meilleure compréhension de la

VII

multidisciplinarité, et de chacune de ces disciplines. Enfin, merci aux équipes administratives des laboratoires.

Au cours de cette thèse, j'ai également eu la possibilité d'assister à l'école d'été idpISS2018, et à ce titre je souhaiterais remercier, le Pr. S. Vajna, le Pr. J.C. Borg, et la Pr. K. Paetzold pour leurs conseils, leurs présentations éclairantes, et leur regard extérieur porté sur mes travaux.

Je tiens également à remercier chacun des industriels qui ont participé au projet, et sans qui je n'aurais pas eu cette compréhension du développement de produits, merci à vous pour votre temps, mais également vos conseils, et de nous avoir fait découvrir votre entreprise. Je tiens également à remercier tout particulièrement S., J., et J. et l'équipe d'ingénierie de l'entreprise d'équipements agricoles pour leur accueil chaleureux, leur temps, et les échanges instructifs sur la réalité des entreprises au Canada. Merci du fond du cœur, j'ai fortement apprécié mes presque 14 jours et ce séjour restera gravé dans ma mémoire.

Par ailleurs, c'est tout naturellement que je souhaite remercier mes proches, tout particulièrement mes parents, et ma sœur. Je souhaite également remercier celles et ceux qui ont partagé mon quotidien, ainsi que mes ami-e-s. Ces personnes ont été un appui indéniable dans la réalisation de cette thèse et dans mon parcours personnel.

Enfin, ces cinq années ont été l'occasion pour moi de rencontrer un grand nombre de personnes, auprès desquelles j'ai pu recevoir des conseils et du soutien, mais également échanger autour de mes travaux. Je remercie chacun d'entre eux ; ils se reconnaîtront à travers ces quelques mots.

Le développement de produits multidisciplinaires à l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire

Julia GUÉRINEAU

RÉSUMÉ

Nos travaux se positionnent dans le cadre général de « **l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire** » qui induit de nombreuses transformations au sein de l'industrie, notamment concernant les produits conçus et leur développement. Sous l'impulsion du numérique et de la connectivité, les produits peuvent évoluer vers des produits multidisciplinaires, dotés de nouvelles capacités et fonctions. Ces produits multidisciplinaires, au sens où nous l'entendons, sont issus de l'intégration de contributions mécaniques, électroniques, électriques, logicielles et des technologies de l'information et des communications. Dans le cadre de ces travaux, les produits mécatroniques, les systèmes cyber-physiques et les produits « intelligents » sont particulièrement considérés pour leur caractère multidisciplinaire.

Cette évolution des produits induit également deux formes de complexité, la complexité intrinsèque au produit et celle liée à l'organisation nécessaire à son développement. En conséquence, il est attendu que la manière dont les entreprises développent ces produits soit adaptée. Cette adaptation du développement de produits s'appuie sur une variété de « **concepts et techniques** » (formulation qui regroupe les **approches, processus, méthodes et outils**) qui peuvent être agencés pour former ce qui a été nommé dans ces travaux une « **structure de développement** ». Ainsi, nous examinons ici le lien entre le produit et la structure de développement à employer. La constitution d'une structure adaptée aux produits multidisciplinaires reste en effet un défi pour les entreprises, notamment de par l'ancrage mono-disciplinaire d'une majorité de ces concepts et techniques. Dès lors, un accompagnement des entreprises semble nécessaire. Cet accompagnement passe, d'une part, par la cartographie de la littérature scientifique en vue d'identifier des structures de développement, et, d'autre part, par la compréhension de la manière dont les entreprises développent actuellement leurs produits multidisciplinaires. Ces volets littérature scientifique et pratiques industrielles ont guidé l'élaboration de notre proposition.

Les contributions apportées par ces travaux sont les suivantes. Premièrement, nos travaux proposent un **modèle de structuration** du développement en quatre niveaux, **basé sur des définitions et un arbre de décision** permettant d'organiser les concepts et techniques en approches, processus, méthodes et outils. La deuxième contribution établit les représentations graphiques, appelées « **cartographies** », du développement des produits mécatroniques, des systèmes cyber-physiques et des produits intelligents, avant de synthétiser l'ensemble en une cartographie du développement de produits multidisciplinaires. Ces cartographies représentent

ainsi les concepts et techniques indiqués dans la littérature pour le développement de produits multidisciplinaires, ainsi que les liens existants entre eux, en vue d'identifier des structures, ou des pans de structure déjà constitués et documentés. La troisième contribution de nos travaux réside dans l'**analyse des pratiques industrielles** par le biais d'entrevues semi-dirigées. Cette collecte de données a permis de réaliser les cartographies des concepts et techniques employés par 10 entreprises pour organiser leurs développements de produits multidisciplinaires. La manière dont les entreprises ont fait évoluer leurs pratiques a également été analysée, à travers l'adaptation ou la sélection de nouvelles pratiques de développement.

Enfin, les écarts et similarités entre les recommandations de la littérature scientifique et la manière dont les entreprises travaillent ont pu être mis en lumière. Sur la base de ces constats, nous proposons une **démarche pour l'élaboration d'une structure de développement** adaptée à chaque entreprise. Cette dernière s'appuie sur un audit permettant de réaliser la cartographie des pratiques industrielles actuelles et sur l'identification des défis en lien avec le développement des produits multidisciplinaires. Enfin, l'élaboration de la structure proposée s'appuie sur l'association entre les défis rencontrés et les concepts et techniques présentés dans les cartographies de la littérature scientifique. Cette démarche a été appliquée chez un manufacturier d'équipement agricole afin d'accompagner son évolution vers des produits multidisciplinaires. Ainsi, nos travaux se positionnent comme une première brique visant à mieux accompagner les entreprises, qui souhaitent tirer parti des évolutions induites par le numérique et la connectivité, à travers la proposition d'une structure de développement adaptée à l'évolution de leurs produits.

Mots-clés : développement de produits, produits multidisciplinaires, mécatronique, systèmes cyber-physiques, produits intelligents, transformation numérique

Multidisciplinary product development in the digital and connectivity era

Julia GUÉRINEAU

ABSTRACT

Our research is framed within the “**ubiquitous digital and connectivity era**” that has led to numerous transformations in the industrial landscape, especially in designed products and their development. Thanks to digital and connectivity technologies, products can now evolve towards multidisciplinary products, fitted with new capacities and functions. These multidisciplinary products, as we define them, emerge from the integration of contributions from mechanical, electrical, electronic, software, and information and communication technologies. In this work, mechatronic products, cyber-physical systems, and “smart” products are especially considered for their multidisciplinary nature.

This product evolution induces two types of complexity, product intrinsic complexity and the complexity related to the organization required for its development. In this sense, it is expected that companies adapt how they develop these products. Product development adaptation relies on a variety of “**concepts and techniques**” (a formulation that encompasses the approaches, processes, methods and tools) which can be organized to form what has been termed in this work a “**development structure**”. Accordingly, our research focuses on the link between the product and the associated development structure to be deployed. However, due to the mono-disciplinary anchoring of most concepts and techniques, the generation of a structure tailored to multidisciplinary products remains a challenge for many companies. Consequently, a support for product developers seems necessary. This support would involve both a cartography of the scientific literature to identify development structures and an understanding of how companies are currently developing their multidisciplinary products. These scientific literature and industrial practice facets have guided the elaboration of our proposition.

The major contributions of this work include the following. First, it proposes a **four-level model** for structuring development, **based on definitions and a decision tree** to organize the concepts and techniques in approaches, processes, methods and tools. It then establishes graphical representations, called “**cartographies**”, of the development of mechatronic products, cyber-physical systems and smart products, before synthesizing them into a multidisciplinary product development cartography. These cartographies represent the concepts and techniques discussed in the literature for the development of multidisciplinary products, as well as the existing links between them, in order to identify the structures, or fragments of structures, already constituted and documented. Another major contribution of our work lies in the **analysis of industrial practices** through semi-structured interviews. This data collection allowed us to establish the cartographies of the concepts and techniques used by 10 companies to organize their multidisciplinary product developments. The way in which

companies have evolved their practices has also been analyzed, through the adaptation or selection of new development practices.

Furthermore, the divergences and similarities between the scientific literature recommendations and the way companies actually work were highlighted. On the strength of these observations, guidelines are proposed for the elaboration of a development structure. These guidelines rely on an audit to establish a cartography of the present practices as well as on the identification of the challenges related to the development of multidisciplinary products. Finally, the elaboration of the proposed structure is based on the association between the challenges encountered and the concepts and techniques depicted in the scientific literature cartographies. These guidelines were applied at an agricultural equipment manufacturer to support its evolution towards multidisciplinary products. Our work is positioned as a cornerstone aiming to better support companies that seek to take advantage of the possibilities offered by digital and connectivity technologies through the proposition of a development structure adapted to their products' evolution.

Keywords: product development, multidisciplinary products, mechatronics, cyber-physical systems, smart products, digital transformation

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE ET DE LA CONNECTIVITÉ UBIQUITAIRE	5
1.1 L'avènement d'une nouvelle ère.....	5
1.1.1 Une quatrième révolution industrielle	9
1.1.2 Des révolutions basées sur des technologies	10
1.1.3 Le développement de produits à l'heure de la 4 ^{ème} révolution industrielle.....	12
1.2 Définition et organisation du processus de développement de produits.....	14
1.3 Le rôle prédominant du développement de produits.....	17
1.4 Le lien entre le produit, son développement et la structuration du développement de produits.....	20
1.5 Des produits mécaniques aux produits multidisciplinaires.....	23
1.6 L'évolution conjointe du produit et de la structure de développement associée	29
CHAPITRE 2 PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE DES TRAVAUX.....	33
2.1 La connectivité : apports et défis pour les produits et leur développement.....	33
2.2 L'Internet des Objets.....	35
2.3 Les produits multidisciplinaires : le cœur de notre étude	39
2.3.1 Systèmes cyber-physiques	41
2.3.2 Produits intelligents	46
2.3.3 Mécatronique	51
2.3.4 Vue globale et positionnement relatif des produits.....	54
2.4 Positionnement de nos travaux	59
2.5 Objectifs de recherche.....	61
2.6 Méthodologie de recherche.....	64
2.7 Synthèse du contexte.....	66
CHAPITRE 3 ÉTAT DE L'ART : LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES	69
3.1 Organiser l'état de l'art : facteurs de positionnement.....	69
3.1.1 1 ^{er} facteur de positionnement : la multidisciplinarité.....	70
3.1.2 2 ^{ème} facteur de positionnement : la structuration des concepts et techniques	70
3.1.3 3 ^{ème} facteur de positionnement : la couverture des concepts et techniques	71

3.1.4	4 ^{ème} facteur de positionnement : la navigation.....	72
3.1.5	La représentation des quatre facteurs.....	72
3.2	Accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques	74
3.2.1	Transformation numérique : stratégies d'entreprise	75
3.2.2	Guider les entreprises vers de nouvelles pratiques de développement	77
3.2.3	Synthèse sur l'accompagnement des entreprises dans l'évolution des pratiques.....	86
3.3	Organiser et structurer le développement de produits	87
3.4	Étudier la pratique du développement de produits dans la littérature scientifique	91
3.4.1	Documenter l'usage de concepts et techniques non spécifiés a priori.....	92
3.4.2	Sélection et adoption de concepts et techniques pour le développement de produits.....	95
3.4.3	Synthèse de la littérature scientifique relative à la pratique industrielle du développement de produits	99
3.5	Comparer la littérature scientifique avec les pratiques industrielles	100
3.6	Synthèse : notre positionnement	101
CHAPITRE 4 LE MODÈLE EN QUATRE NIVEAUX : STRUCTURER LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS		
4.1	Nécessité d'un nouveau modèle de structuration des concepts et techniques	107
4.1.1	Définitions et modèles de structuration des concepts et techniques	108
4.1.2	Proposition d'un modèle de structuration des concepts et techniques....	115
4.2	Le modèle APMO en quatre niveaux : structurer le développement et organiser la littérature	116
4.2.1	Le modèle APMO en quatre niveaux : définitions	117
4.2.2	Le modèle APMO en quatre niveaux : arbre de décision pour la classification	122
4.3	Synthèse : notre modèle APMO en quatre niveaux	128
CHAPITRE 5 CARTOGRAPHIE EN QUATRE NIVEAUX DU DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES.....		
5.1	Méthodologie pour la revue de littérature.....	132
5.1.1	Collecte des concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires.....	132
5.1.2	Modèle en quatre niveaux : légende pour la cartographie	134
5.1.3	Exemple de construction étape par étape d'une cartographie.....	137
5.2	Cartographie et synthèse du développement de produits mécatroniques	140
5.3	Cartographie et synthèse du développement des systèmes cyber-physiques.....	151
5.4	Cartographie et synthèse du développement des produits « intelligents »	156
5.5	Analyse des cartographies.....	161
5.6	Cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaires	166
5.7	Synthèse : nos cartographies du développement de produits multidisciplinaires.....	171

CHAPITRE 6	ÉTUDE DESCRIPTIVE : LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES DANS L'INDUSTRIE	175
6.1	Méthodologie pour l'étude des pratiques industrielles en matière de développement de produits multidisciplinaires	176
6.1.1	Critères de sélection des participants	178
6.1.2	Guide et processus d'entrevue	178
6.1.3	Présentation des entreprises participantes.....	179
6.1.4	Résultats des entrevues : structuration en 4 thèmes.....	181
6.1.5	Analyse et représentation des résultats	182
6.2	Résultats de l'étude : contexte de l'entreprise et produits multidisciplinaires développés.....	184
6.3	Résultats de l'étude : concepts et techniques employés.....	185
6.3.1	Cartographie des entreprises	185
6.3.2	Approches discutées et/ou employées par les entreprises.....	188
6.3.3	Processus discutés et/ou employés par les entreprises.....	190
6.3.4	Méthodes discutées et/ou employées par les entreprises	192
6.3.5	Outils discutés et/ou employés par les entreprises.....	194
6.4	Résultats de l'étude : sélection et adaptation des concepts et techniques.....	196
6.4.1	Adaptation des concepts et techniques	199
6.4.2	Sélection des concepts et techniques	201
6.4.3	Synthèse de la sélection et adaptation des concepts et techniques	203
6.5	Synthèse de l'étude des pratiques industrielles.....	204
CHAPITRE 7	COMPARAISON DES VOLETS LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE ET PRATIQUES INDUSTRIELLES	207
7.1	Comparaison entre les recommandations de la littérature scientifique et les pratiques industrielles	207
7.2	Lignes directrices pour l'élaboration d'une démarche d'accompagnement	214
7.3	Synthèse de la comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles..	219
CHAPITRE 8	DÉMARCHE POUR L'ACCOMPAGNEMENT DES ENTREPRISES DANS LA GÉNÉRATION D'UNE STRUCTURE DE DÉVELOPPEMENT	221
8.1	Proposition : démarche d'accompagnement	221
8.1.1	Analyser le contexte interne et externe de l'entreprise et du développement	224
8.1.2	Déterminer les défis inhérents au développement de produits multidisciplinaires.....	225
8.1.3	Établir la cartographie actuelle des concepts et techniques utilisés.....	226
8.1.4	Identifier les manques, les pistes d'amélioration et les objectifs.....	227
8.1.5	Sélectionner au sein des cartographies de la littérature scientifique les concepts et techniques applicables	229
8.1.6	Générer une nouvelle structure sur la base des concepts et techniques sélectionnés	231

8.1.7	Positionner les méthodes et outils sur les étapes du processus	231
8.1.8	Déploiement sur un projet pilote reflétant le projet.....	233
8.1.9	Mesurer l'efficacité, identifier les points d'amélioration	233
8.2	Évaluation de la démarche d'accompagnement et de ses constituantes	234
8.3	Synthèse de la proposition	239
CHAPITRE 9 APPLICATION DE NOS TRAVAUX : ÉTUDE DE CAS DU DÉVELOPPEMENT D'UN ÉQUIPEMENT AGRICOLE.....		
9.1	Méthodologie de l'étude de cas et mise en contexte.....	243
9.2	Contexte de l'entreprise et caractéristiques du produit à développer	245
9.3	Défis rencontrés en lien avec le développement et le produit associé.....	249
9.4	Établir la cartographie actuelle des concepts et techniques utilisés.....	254
9.5	Identifier les manques, les pistes d'amélioration et les objectifs.....	257
9.6	Sélection des concepts et techniques au sein des cartographies de la littérature scientifique.....	259
9.7	Générer une nouvelle structure sur la base des concepts et techniques sélectionnés	268
9.8	Positionner les méthodes et outils sur les étapes du processus	269
9.9	Transfert à l'entreprise pour implémentation	271
9.10	Synthèse de l'application de nos travaux sur un cas industriel.....	272
CHAPITRE 10 DISCUSSION, LIMITES ET PERSPECTIVES		
10.1	Le modèle APMO en quatre niveaux : limites et perspectives.....	275
10.2	Cartographie de la littérature scientifique : limites et perspectives	276
10.3	Analyse des pratiques industrielles : limites et perspectives	279
10.4	La démarche d'accompagnement : limites et perspectives.....	282
10.5	Synthèse de la discussion.....	283
CONCLUSION.....		
ANNEXE I AUTRES TERMINOLOGIES DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES		
ANNEXE II REQUÊTES EFFECTUÉES DANS LES BASES DE DONNÉES		
ANNEXE III LE DÉVELOPPEMENT MÉCATRONIQUE		
ANNEXE IV LE DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES.....		
ANNEXE V LE DÉVELOPPEMENT DES PRODUITS INTELLIGENTS		
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		
BIBLIOGRAPHIE		

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1	Travaux permettant d’accompagner les entreprises dans l’évolution de leurs concepts et techniques77
Tableau 3.2	Travaux organisant des concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires88
Tableau 3.3	Travaux documentant l’usage de concepts et techniques non spécifiés a priori pour le développement de produits au sein des entreprises94
Tableau 3.4	Travaux documentant la sélection et l’adaptation de concepts et techniques pour le développement de produits au sein des entreprises96
Tableau 5.1	Synthèse des calculs de la densité générale et du consensus général et par niveau pour le développement des SCP, des produits mécatroniques et intelligents.....164
Tableau 6.1	Présentation des entreprises interrogées dans le cadre de nos travaux180
Tableau 9.1	Interlocuteurs rencontrés pour l’étude de cas244
Tableau 9.2	Défis relatifs au produit et au développement au sein de l’entreprise étudiée251
Tableau 9.3	Concepts et techniques solutionnant partiellement ou totalement les défis266

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Rôles facilitateur et complexificateur des technologies du numérique et de la connectivité sur le développement de produits14
Figure 1.2	Représentation du cycle de vie du produit et positionnement du développement Tirée de Terzi et al.(2010)15
Figure 1.3	Comparaison des modèles de processus de développement issus de différentes communautés et pour le développement de différents types de produits Tirée de Gericke et Blessing (2012)16
Figure 1.4	Illustration des possibilités d’influencer les coûts et de corriger les erreurs au cours du développement Tirée de INCOSE (2015).....19
Figure 1.5	Liens entre le produit et le processus de développement, les concepteurs et les utilisateurs Tirée de Eckert et Clarkson (2005)21
Figure 1.6	Évolution des systèmes purement mécaniques en systèmes mécatroniques Tirée de Isermann (2002)24
Figure 1.7	Évolution des produits électriques en produits intelligents Tirée de Thebault (2013)25
Figure 1.8	Le développement de produits vers « l’intelligence et la connectivité » Tirée de Zheng, Xu et Chen (2018)26
Figure 1.9	Vue de synthèse de l’agencement des révolutions industrielles, ères associées, stratégies d’intégration fonctionnelle et évolution des produits27
Figure 1.10	Synthèse du chapitre 1 : l’évolution conjointe des produits traditionnels en produits multidisciplinaires et de la structuration du développement associée31
Figure 2.1	Évolution des premiers réseaux vers l'Internet des Objets Tirée de Perera et al. (2014).....36
Figure 2.2	Représentation de quatre types d’architecture de l'Internet des Objets Tirée de Al-Fuqaha et al. (2015).....38
Figure 2.3	Architecture générique d'un système cyber-physique Tirée de Darwish et Hassanien (2018).....43

Figure 2.4	Les systèmes cyber-physiques à la confluence de différents domaines Tirée de Rajkumar (2012).....	45
Figure 2.5	Architecture générique d'un produit intelligent	50
Figure 2.6	Architecture générique d'un système mécatronique moderne Tirée de Tomizuka (2006)	52
Figure 2.7	Vue de synthèse des différentes appellations de produits multidisciplinaires.....	55
Figure 2.8	Agencement des objectifs spécifiques de recherche vers la réalisation de l'objectif général	63
Figure 2.9	Méthodologie générale adoptée pour nos travaux	66
Figure 2.10	Synthèse thématique du chapitre 2 : produits multidisciplinaires et Internet des Objets	67
Figure 3.1	Codification des tableaux de synthèse	73
Figure 3.2	Framework de transformation numérique : quatre dimensions essentielles Tirée de Matt, Hess et Benlian (2015).....	75
Figure 3.3	Illustration de l'effet escompté de « l'implémentation » : un usage pérenne Tirée de Stetter et Lindemann (2005) (adaptée de Norell).....	78
Figure 3.4	Catégories de facteurs pour la sélection de processus et de méthodes de développement de produits Tirée de Wilmsen, Dühr et Albers (2019)	80
Figure 3.5	Démarche d'ingénierie et de modélisation des processus Tirée de Vajna (2005)	81
Figure 3.6	Les 5 étapes du modèle d'implémentation des méthodes Tirée de Stetter et Lindemann (2005)	84
Figure 3.7	Démarche pour la création d'une « méthode situationnelle » Tirée de Brinkkemper (1996).....	85
Figure 3.8	Illustration de la structuration par le biais de matrices Tirée de Goevert et Lindemann (2018).....	90
Figure 3.9	Synthèse du chapitre 3 : identification des connaissances, des manques et positionnement relatif à nos différents objectifs	102

Figure 4.1	Agencement du processus, des méthodes, des outils et de l'environnement, et l'influence des facteurs technologiques et humains sur cet agencement Tirée de Estefan (2008)110
Figure 4.2	Agencement hiérarchique entre processus, méthodes et outils Tirée de Legendre, Lanusse et Rauzy (2016)111
Figure 4.3	Vue hiérarchique des trois niveaux Tirée de Mann (2010).....112
Figure 4.4	Relation entre les termes scientifiques Tirée de Adams (2015)114
Figure 4.5	Modèle APMO en quatre niveaux pour la structuration du développement de produits : approche, processus, méthode et outil.....120
Figure 4.6	Pyramide hiérarchique ordonnant les quatre niveaux APMO par leur degré d'abstraction, d'opérationnalisation et par leur portée temporelle 121
Figure 4.7	Arbre de décision pour la classification des concepts et techniques123
Figure 4.8	Application de l'arbre de décision au classement de concepts et techniques de l'ensemble Agile127
Figure 4.9	Synthèse du chapitre 4 : un modèle en quatre niveaux, appuyé par des définitions et un arbre de décision129
Figure 5.1	Légende des cartographies de la littérature scientifique et code couleur pour l'identification des approches et les concepts et techniques associés136
Figure 5.2	Illustration étape par étape de la construction de la cartographie relative à l'Ingénierie Système et au cycle en V139
Figure 5.3	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur l'ensemble IS143
Figure 5.4	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur Agile et la conception systématique144
Figure 5.5	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Autres concepts et techniques (1).....145

Figure 5.6	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Autres concepts et techniques (2).....	146
Figure 5.7	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur l'hybridation entre Agile et l'Ingénierie système	147
Figure 5.8	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des SCP – Vue centrée sur les concepts et techniques Agile et IS	154
Figure 5.9	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des SCP – Autres concepts et techniques	155
Figure 5.10	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des produits intelligents (1/2)	159
Figure 5.11	Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des produits intelligents (2/2)	160
Figure 5.12	Légende et code couleur pour la cartographie de synthèse.....	167
Figure 5.13	Cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaires.....	169
Figure 5.14	Synthèse du chapitre 5 : les cartographies et faits saillants	172
Figure 6.1	Vue d'ensemble de la méthodologie adoptée pour conduire l'étude des pratiques industrielles	177
Figure 6.2	Vue d'ensemble de la diversité en termes de localisation, de nombre d'employés, d'année de création, de stratégie commerciale et de disciplines maîtrisées à l'interne	181
Figure 6.3	Légende pour la représentation des concepts et techniques pour les besoins de l'étude des pratiques industrielles.....	183
Figure 6.4	Approches, processus, méthodes et outils « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés » par les entreprises pour développer des produits multidisciplinaires	186
Figure 6.5	Approches mentionnées et utilisées, non mentionnées mais utilisées et mentionnées mais non utilisées par les entreprises.....	189

Figure 6.6	Processus mentionnés et utilisés, non mentionnés mais utilisés et mentionnés mais non utilisés par les entreprises191
Figure 6.7	Méthodes mentionnées et utilisées, non mentionnées mais utilisées et mentionnées mais non utilisées par les entreprises.....193
Figure 6.8	Outils mentionnés et utilisés, non mentionnés mais utilisés et mentionnés mais non utilisés par les entreprises195
Figure 6.9	Sélection et adaptation des concepts et techniques conduites par les entreprises de l'échantillon198
Figure 6.10	Synthèse du chapitre 6 : analyse des pratiques industrielles sur deux thèmes : « concepts et techniques pour le développement de produits », et « sélection et adaptation de concepts et techniques »205
Figure 7.1	Cartographie de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles : entreprises A à J213
Figure 7.2	Synthèse la comparaison des volets pratiques industrielles et littérature scientifique menant à l'élaboration de la démarche d'accompagnement 220
Figure 8.1	Démarche d'accompagnement des entreprises pour la génération d'une structure de développement222
Figure 8.2	Identification des manques et pistes d'amélioration en vue de définir les objectifs, indicateurs et valeurs cibles227
Figure 8.3	Utilisation des cartographies de la littérature scientifique pour la sélection des concepts et techniques230
Figure 8.4	Positionnement des méthodes et outils sur les étapes du processus232
Figure 8.5	Validation idéale de la démarche d'accompagnement et de ses constituantes.....236
Figure 8.6	Synthèse de notre démarche pour l'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement.....240
Figure 9.1	Représentation de la barre de coupe d'une moissonneuse-batteuse Tirée de El Aissaoui (2015)246
Figure 9.2	Synthèse de l'évolution des produits et du département d'ingénierie au sein de l'entreprise étudiée.....247

Figure 9.3	Structure de développement initiale de l'entreprise étudiée.....	256
Figure 9.4	Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le défi 8 en lien avec le déroulement du développement.....	261
Figure 9.5	Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le défi 6 en lien avec la formulation du besoin client et des exigences ...	262
Figure 9.6	Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le défi 1 en lien avec la modularité du produit.....	263
Figure 9.7	Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le défi 14 en lien avec la génération et la sélection d'idées	264
Figure 9.8	Proposition d'une structure de développement pour l'entreprise étudiée sur la base du modèle APMO	267
Figure 9.9	Positionnement des méthodes et outils sur les étapes du processus pour accompagner le développement d'un équipement agricole de nouvelle génération	270

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2TUP	<i>2 Tracks Unified Process</i>
AADL	<i>Architecture Analysis and Design Language</i>
ADL	<i>Architecture Description Language</i>
AFIS	Association Française d'Ingénierie Système
AFNOR	Association Française de Normalisation
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AMDE(C)	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (et de leur Criticité) - <i>FME(C)A en anglais</i>
AmI	<i>Ambient Intelligence</i> - Intelligence ambiante
APTE	Application aux Techniques d'Entreprise
ASD	<i>Adaptative Software Development</i>
B2B	<i>Business-to-Business</i>
B2C	<i>Business-to-Consumer</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CAs	<i>Customer Attributes</i>
CNRTL	Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales
CONSENS	<i>Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems</i>
CPM/PDD	<i>Characteristics Properties Modelling / Property Driven Development</i>
DAD	<i>Disciplined Agile Delivery</i>

DEVS	<i>Discrete Event System Specification</i>
DfA	<i>Design for Assembly</i> - Conception pour l'assemblage
DFC	<i>Design for Control</i>
DfD	<i>Design for Disassembly</i> - Conception pour le désassemblage
DfE	<i>Design for Environment</i> - Conception pour l'environnement
DfM	<i>Design for Manufacturing</i> - Conception pour la fabrication
DfMA	<i>Design for Manufacturing and Assembly</i> - Conception pour la fabrication et l'assemblage
DfX	<i>Design for X</i> – Conception pour X
DMM	<i>Domain Mapping Matrix</i>
DPs	<i>Design Parameters</i>
DSM	<i>Design Structure Matrix</i> - Matrice de structure de conception
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FAST	<i>Function Analysis System Technique</i>
FOMM	<i>Function and Object Mapping Model</i>
FRs	<i>Functional Requirement</i>
HCD	<i>Human-Centered Design</i> - Conception centrée sur l'humain
HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i>
HoQ	<i>House of Quality</i> - Maison de la qualité
HOOM	<i>High Order Object Model</i>
IDEF0	<i>Icam DEFinition for Function modeling</i>

IdO	Internet des Objets
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHM	Interface Homme-Machine
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
INCOSE	<i>International Council on Systems Engineering</i>
IP	<i>Internet Protocol</i> - Protocole Internet
IPD	<i>Integrated Product Development</i> - Développement de produits intégré
IPPM	<i>Integrated Product, Process and Manufacturing System Development</i>
IS	Ingénierie Système
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organisation internationale de normalisation
KBE	<i>Knowledge-Based Engineering</i> - Ingénierie à base de connaissances
LCA	<i>Lifecycle Assessment</i>
LPD	<i>Lean Product Development</i> - Développement de produits Lean
M2M	<i>Machine-to-Machine</i> - Machine à machine
MANET	<i>Mobile Ad hoc NETwork</i>
MBSE	<i>Model-Based Systems Engineering</i> - Ingénierie système basée sur les modèles
MDM	<i>Multiple-Domain Matrix</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
NPD	<i>New Product Development</i>
OO	<i>Object-Oriented</i>

PBD	<i>Platform-Based Design</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PDM	<i>Product Data Management</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
PME	Petites et Moyennes Entreprises
PP	<i>Pragmatic Programming</i>
PVs	<i>Process Variables</i>
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> - Déploiement de la fonction qualité
RCP	<i>Rapid Control Prototyping</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RUP	<i>Rational Unified Process</i>
SADT	<i>Structured Analysis and Design Technics</i>
SCP	Systèmes Cyber-Physiques - <i>Cyber-physical systems</i>
SFA	<i>Signal Flow Analysis</i>
SIL	<i>Software-in-the-loop</i>
SPALTEN	Analyse de la situation (<i>Situationsanalyse</i>), Délimitation du problème (<i>Problemeingrenzung</i>), Identification de solutions alternatives (<i>Alternative Lösungssuche</i>), Sélection de solutions (<i>Lösungsauswahl</i>), Analyse des conséquences (<i>Tragweitenanalyse</i>), Prise de décision et Mise en œuvre (<i>Entscheiden/Umsetzen</i>), Récapitulatif et Apprentissage (<i>Nacharbeiten/Lernen</i>)
SysML	<i>Systems Modeling Language</i>
TAF	<i>The Agile Framework</i>
TDD	<i>Test-Driven Development</i>

TI	Technologies de l'Information
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
TQM	<i>Total Quality Management</i> - Management de la qualité totale
TRIZ	Théorie de Résolution des Problèmes Inventifs
UbiComp	<i>Ubiquitous Computing</i> - Informatique ubiquitaire
UI	<i>User-interface</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
UP	<i>Unified Process</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UWB	<i>Ultra WideBand</i>
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> - Association des ingénieurs allemands
WAP	<i>Wireless Application Protocol</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
WSAN	<i>Wireless Sensor and Actuator Network</i>
XP	<i>Extreme Programming</i>
ZOPH	<i>Ziel, Objekt, Prozess, Handlung</i> - But, Objet, Processus, Action

INTRODUCTION

Le numérique et la connectivité sont devenus omniprésents dans les produits et services que nous utilisons au quotidien, nous menant à expérimenter une nouvelle ère, qualifiée par la suite d'**ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire**. Ces produits, comparés à leurs précédentes générations, sont considérés comme plus performants, disposent de davantage de fonctionnalités, apprennent de leurs utilisateurs et de leur environnement, collectent et échangent des données avec d'autres produits. En tant qu'utilisateurs, nous nous retrouvons progressivement au centre d'un « écosystème » de produits interconnectés.

L'intégration de ces technologies au sein de nouveaux produits requiert le travail collaboratif d'acteurs issus de différentes disciplines que sont la mécanique, l'électronique, l'électricité, le logiciel et la connectivité, rendant ainsi les **produits multidisciplinaires**. Les possibilités offertes par l'intégration de ces disciplines sont nombreuses. À titre d'exemple, le logiciel permet une personnalisation importante et une augmentation de la performance, alors que les données collectées par l'entremise de la connectivité peuvent aider les industriels à mieux comprendre l'usage du produit et à développer de nouveaux modèles d'affaires. Toutefois, ces produits multidisciplinaires, souvent complexes, amènent les entreprises à reconsidérer la façon dont elles organisent leur développement, parfois en rupture avec les pratiques actuelles.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous penchons sur l'évolution du développement requise pour piloter les évolutions actuelles des produits vers des produits multidisciplinaires. Notre intérêt est notamment motivé par le fait que le développement revêt une importance stratégique pour l'entreprise. Ainsi, à l'ère où plusieurs entreprises développant des produits pouvant être qualifiés de « traditionnels » s'interrogent sur le développement de ces nouveaux produits multidisciplinaires, nous nous intéressons à la question de leur accompagnement dans cette évolution.

Cet accompagnement des entreprises est abordé à travers les concepts et techniques préconisés pour conduire le développement de produits multidisciplinaires, ainsi que la manière dont ceux-ci doivent être sélectionnés et structurés en regard du produit à développer. L'identification de concepts et techniques appropriés pour accompagner un développement de produit multidisciplinaire s'avère en effet difficile du fait de la mixité des disciplines et des héritages associés avec lesquels il faut composer. Nos travaux cherchent en ce sens à permettre aux entreprises de sélectionner parmi des concepts et techniques préconisés pour le développement de produits multidisciplinaires.

Les travaux présentés tout au long de ce manuscrit visent ainsi à comprendre et accompagner la transition des entreprises vers un développement de produits multidisciplinaires. Cela passe, d'une part, par l'organisation des connaissances sur les concepts et techniques disponibles. D'autre part, l'accompagnement passe également par la compréhension de la manière dont les entreprises développent actuellement leurs produits. Notre proposition se situe à la croisée de ces deux volets. La suite de l'introduction décrit succinctement le contenu et les apports des différents chapitres de ce manuscrit.

Le **CHAPITRE 1** présente le contexte général menant à la problématique de nos travaux, à travers la définition et l'agencement relatif des concepts généraux que sont, notamment, l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire, mais aussi le développement de produits et l'évolution des produits vers des produits multidisciplinaires.

Le **CHAPITRE 2** approfondit certains éléments de notre contexte, notamment en lien avec les apports et défis soulevés par l'intégration de la connectivité, puis la présentation de l'Internet des Objets. Le chapitre 2 précise les trois types de produits multidisciplinaires considérés dans nos travaux que sont la mécatronique, les systèmes cyber-physiques et les produits dits « intelligents », avant de présenter nos objectifs et la méthodologie de recherche adoptée.

Le **CHAPITRE 3** permet de préciser notre positionnement scientifique à travers l'analyse de la littérature scientifique en lien avec l'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement de produits d'un point de vue prescriptif, mais aussi à travers des études descriptives qui abordent le développement de produits en pratique.

Le **CHAPITRE 4** propose un modèle en quatre niveaux, accompagné d'un arbre de décision permettant le classement systématique des concepts et techniques en approche, processus, méthode ou outil. Ce classement permet de conduire les analyses proposées aux chapitres suivants.

Le **CHAPITRE 5** propose une analyse et une cartographie des concepts et techniques discutés par la littérature scientifique pour accompagner le développement des produits mécatroniques, des systèmes cyber-physiques, puis des produits intelligents, avant de proposer une cartographie de synthèse. Ce chapitre constitue le volet « littérature scientifique » de nos travaux.

Le **CHAPITRE 6** s'attarde sur la manière dont 10 entreprises issues de différents secteurs industriels développent leurs produits multidisciplinaires, en termes de concepts et techniques employés, et comment ces entreprises ont pu modifier leurs pratiques de développement. Ce chapitre constitue le volet « pratiques industrielles » de nos travaux.

Le **CHAPITRE 7** compare les volets « littérature scientifique » et « pratiques industrielles » afin d'identifier les écarts et les similarités qui aboutissent à la proposition de lignes directrices pour la constitution d'une démarche d'accompagnement des entreprises.

Le **CHAPITRE 8** propose une démarche d'accompagnement afin de guider les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement conjointement à l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires. L'évaluation de cette démarche est également discutée.

Le **CHAPITRE 9** présente une application de la démarche d'accompagnement au sein d'une entreprise d'équipements agricoles et cherche ainsi à illustrer la manière dont la démarche peut être mise en pratique.

Le **CHAPITRE 10** discute des principales contributions de nos travaux, de leurs limites, ainsi que de leurs perspectives.

La **CONCLUSION** revient sur l'atteinte de nos objectifs et souligne les apports de nos travaux, tant pour les communautés scientifiques qu'industrielles.

CHAPITRE 1

LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES À L'ÈRE DU NUMÉRIQUE ET DE LA CONNECTIVITÉ UBIQUITAIRE

Ce chapitre présente une vue synthétique concernant l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire dans laquelle nos travaux prennent place. Cette ère se traduit par des changements technologiques, sociaux, économiques, voire politiques (Schwab, 2016) et est enlignée avec l'avènement de la quatrième révolution industrielle. Les produits, services et modèles d'affaires associés, ainsi que leur développement et leur production sont alors amenés à évoluer. Nos travaux s'intéressent à l'évolution requise au sein des entreprises afin d'appuyer le développement de ces nouveaux produits multidisciplinaires. C'est à travers cette évolution des produits dans un contexte industriel en pleine mutation qu'émerge notre problématique de recherche.

1.1 L'avènement d'une nouvelle ère

Au début des années 2000, chaque marque de téléphone portable avait son propre système d'exploitation, combiné avec des applications et programmes développés en interne. Un peu plus tard, les téléphones cellulaires étaient en mesure de transférer des fichiers exclusivement vers d'autres téléphones par infrarouge ou vers un ordinateur via une connexion filaire USB. L'accès à Internet était principalement possible à basse vitesse à domicile ou via un téléphone cellulaire grâce au *Wireless Application Protocol*, le WAP. Vingt ans après, le développement des technologies de l'information et des communications (TIC) (Li, 2017 ; Feng *et al.*, 2018), l'intégration de la connectivité (Porter et Heppelmann, 2014), ou encore la miniaturisation des composants électroniques (Lasi *et al.*, 2014 ; Tomizuka, 2006) combinée avec la diminution de leurs coûts (Thebault, 2013), offrent de nouvelles possibilités d'un point de vue technique. Les téléphones cellulaires sont désormais de véritables ordinateurs qui peuvent se connecter à différents appareils et systèmes, tels que des montres, chandails, haut-parleurs, ordinateurs,

automobiles, systèmes domotiques, etc. Certains de ces appareils peuvent collecter des données de leur environnement, ou encore agir sur ce dernier. L'Internet s'étend aux objets et est accessible à haut-débit à domicile, mais également à l'extérieur, dans les zones couvertes. Le nombre d'objets connectés dans le monde est en constante augmentation (Iansiti et Lakhani, 2014). Ces différentes transformations forment l'idée d'un environnement axé sur la connectivité et de son omniprésence ou ubiquité¹.

Concernant l'informatique et le domaine du logiciel, l'accroissement des puissances de calcul – modélisées par la loi de Moore (Waldrop, 2016) – ou encore l'amélioration des capacités et la diminution des coûts de stockage, ont permis le développement de programmes plus complexes, disposants de capacités d'apprentissage, d'adaptation, et de personnalisation à moindre coût. L'analyse automatisée, mais aussi la sécurité des données issues de ces nouveaux produits sont devenues des enjeux clés. L'informatique évolue également à travers le développement de domaines tels que l'intelligence artificielle, reposant sur le développement de l'apprentissage machine (*Machine Learning*), de l'apprentissage profond (*Deep Learning*) (Lecun, Bengio et Hinton, 2015), ou encore à travers le domaine des mégadonnées et de leur analyse (*Big Data*). Différents auteurs font état de l'accroissement de la part du logiciel au sein des produits (Porter et Heppelmann, 2014 ; Fricker, 2012 ; Ebert, 2013 ; Wan, Canedo et Al Faruque, 2017 ; Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; Kim et Kumar, 2012). De ce second ensemble de technologies semble émerger l'idée de ce qui est communément appelé le « numérique ». Ce terme englobe ainsi un éventail important de technologies en lien avec les données, leur gestion, leur analyse et leur valorisation.

Ces transformations complémentaires, dans les domaines du numérique et de la connectivité, ont ainsi profondément changé la nature des produits comme le mentionne Wan *et al.* à travers l'exemple de l'automobile. Les véhicules actuels ne seraient ainsi plus des systèmes à

¹ Caractère de ce qui existe partout. – Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) - <https://www.cnrtl.fr/definition/ubiquit%C3%A9>

dominante mécanique. Le comportement de ces systèmes repose sur des logiciels, des calculateurs de plus en plus nombreux, et la connectivité au sein des véhicules (Wan, Canedo et Al Faruque, 2017). L'automobile n'est pas un cas à part, les produits de grande consommation en sont d'autres exemples (Rijdsdijk et Hultink, 2009). Brosse à dents², balance³, ampoule électrique, montre⁴, enceinte acoustique⁵, table à repasser⁶, raquette de tennis, chaussures⁷, chandail, systèmes de surveillance⁸, pot de fleurs⁹, aspirateurs, tondeuses¹⁰, etc. sont autant de produits qui incluent désormais des capacités de traitement de l'information, de connectivité, de la micro-électronique, des capteurs, parfois des actionneurs, et des fonctions basées sur l'apprentissage induisant un certain degré d'autonomie (Pellerin, Rivest et Danjou, 2016 ; Danjou, Rivest et Pellerin, 2017a). Ces produits s'invitent dans notre quotidien et les produits traditionnels évoluent en conséquence, parfois poussés par la technologie, laissant entrevoir une vision « techno-push », ou à l'inverse dans une vision « application-pull » (Lasi *et al.*, 2014).

En regard de ces évolutions technologiques, différents facteurs et défis invitent ainsi au changement. D'un point de vue global, la raréfaction et l'augmentation du prix des ressources et de l'énergie, les changements climatiques, mais également les changements démographiques, à travers notamment le vieillissement de la population et le manque de main-d'œuvre dans certains secteurs, ou encore les changements économiques avec la mondialisation des marchés (Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 ; Erol, Schumacher et Sihn, 2016) posent de nouvelles interrogations et défis pour l'avenir de l'industrie, notamment manufacturière. En ce sens, certaines entreprises ont fait le choix de l'innovation frugale, du

² <https://www.oralb.ca/fr-ca/collections-produits/brosses-a-dents-electriques/serie-io-9>

³ <https://www.fitbit.com/global/fr-ca/products/scales>

⁴ <https://www.garmin.com/fr-FR/c/wearables-smartwatches/>

⁵ <https://www.ultimateears.com/fr-ca/wireless-speakers/blast.html>

⁶ <https://www.laurastar.fr/>

⁷ <https://www.nike.com/adapt>

⁸ <https://www.stanleysecurity.ca/fr/residentiel>

⁹ <https://www.01net.com/actualites/ifa-2016-parrot-pot-le-pot-de-fleur-connecte-qui-prend-soin-de-votre-plante-1032313.html>

¹⁰ <https://www.husqvarna.com/us/robotic-lawn-mowers/>

low-tech, ou encore la recherche du *low-impact*. Par ailleurs, la compétition entre les entreprises reste une course à l'innovation et à la diminution des temps de mise sur le marché. Les entreprises continuent à s'appuyer sur le triptyque coût, qualité, délai, auquel s'ajoutent des considérations supplémentaires telles que la performance, la fiabilité ou encore « l'intelligence » (Warniez, Penas et Soriano, 2012). Enfin, les services associés aux produits se développent également (Lukei *et al.*, 2016 ; Erol, Schumacher et Sihn, 2016 ; Brandmeier *et al.*, 2016 ; Tomizuka, 2006 ; Qi, Hu et Peng, 2018 ; Schuh, Rudolf et Breunig, 2016 ; Mahut, 2019), et certaines entreprises se tournent alors vers l'économie de fonctionnalité qui permet d'envisager de nouveaux modèles d'affaires basés sur « la vente d'un service plutôt que du produit qui le rend » (Van Durme, Beaulieu et Margni, 2016). D'un point de vue marketing, la modification du comportement des consommateurs a engendré la permutation d'un marché favorable au vendeur, à un marché favorable à l'acheteur (Lasi *et al.*, 2014). Les consommateurs veulent un produit unique, personnalisé ou personnalisable, résultant en une variété importante de produits (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; Brandmeier *et al.*, 2016 ; Paes *et al.*, 2018).

Ainsi, c'est à la confluence des défis globaux et industriels, mais également du développement des technologies en lien avec le numérique et la connectivité que se profile l'idée d'une nouvelle ère. Cette ère, que nous qualifierons d'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire, traduit l'idée selon laquelle la pluralité des artefacts nous entourant aspirent à être connectés, à collecter des données sur leurs usages, et leurs usagers, permettant l'amélioration des performances du produit ; ces artefacts intègrent également du traitement de l'information et peuvent possiblement agir sur leur environnement (Lee, 2010). Bien au-delà de l'aspect « gadget » qui est prêté à certains produits de grande consommation, ce sont les apports croisés du numérique et de la connectivité qui nous intéressent. Ces technologies transforment les produits et leur environnement, leur développement, leur production, les modèles d'affaires associés, et leur recyclage. Au-delà de l'aspect technique, la technologie a également une influence sur nous, en tant qu'êtres humains, et tend à modifier nos comportements. Elle affecte « nos façons de percevoir, de mémoriser, de raisonner, de définir des valeurs, des

appartenances, des désirs, et des identités, mais aussi nos modes de rencontre, nos modalités d'interaction et nos manières d'être et d'agir ensemble » (Steiner, 2010). Ces différents changements engendrent également une complexification des organisations industrielles. Ainsi, l'avènement de cette ère passe possiblement par une nouvelle révolution industrielle.

1.1.1 Une quatrième révolution industrielle

Trois révolutions industrielles se sont succédé au cours des derniers siècles, façonnant le paysage industriel actuel. Chacune des différentes révolutions industrielles a apporté de profondes transformations à l'industrie, à l'économie, ainsi qu'à la société. Les révolutions ont permis de produire en plus grande quantité, plus rapidement et à moindre coût, améliorant ainsi la productivité (Drath et Horch, 2014). Comme nous le verrons ci-après, chaque révolution a été constatée *a posteriori* et s'est appuyée sur une ou plusieurs technologies. Ainsi, la première révolution industrielle est apparue dans la seconde moitié du 18^{ème} siècle à travers la mécanisation et l'apparition des premiers métiers à tisser alimentés par des moteurs à vapeur. Le début du 20^{ème} siècle voit l'apparition de la deuxième révolution industrielle qui s'appuie sur l'électrification permettant l'augmentation des cadences de production. Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, l'émergence de l'électronique, puis de l'informatique permettent l'avènement de la troisième révolution industrielle à travers l'automatisation de la production (Bloem *et al.*, 2014).

À chaque révolution s'est vue succéder une ère. Là où une révolution industrielle est considérée comme rapide et en rupture, l'ère se traduit par une forme de continuité qui permet d'améliorer et de développer ces technologies, leur permettant de croître en maturité.

En 2011, le terme « Industrie 4.0 » fait son apparition à la foire d'Hanovre en Allemagne, signant une initiative allemande composée d'industriels et d'universitaires. Ce terme a par la suite été associé comme un synonyme de la quatrième révolution industrielle. L'essence même de cette initiative est de réindustrialiser l'Allemagne, mais également de développer et

renforcer la compétitivité de l'industrie manufacturière en s'appuyant sur de nouvelles technologies (Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 ; Erol, Schumacher et Sihm, 2016). L'industrie allemande est en partie composée d'équipementiers, de fabricants de machines et robots industriels, d'entreprises manufacturant des biens de consommations ou encore de constructeurs automobiles. C'est à ces secteurs industriels que semble initialement s'adresser l'Industrie 4.0. Cette initiative a ensuite été calquée et étiquetée de différentes manières dans le monde. On retrouve alors l'équivalent chinois, « Made In China 2025 » (Li, 2017) ; français à travers l'initiative « Usine du Futur » du programme « La nouvelle France » (Faure et Darmayan, 2016 ; Posada *et al.*, 2015 ; Association Française de Mécanique, 2015) ; les États-Unis optent pour le terme de « Smart Industry » et d'autres termes font également leur apparition tels que « Digital Factory », « Make in India », « Usine 4.0 », « Industrial Internet » ou encore « Industry of the Future » pour n'en citer que quelques-uns (Danjou, Rivest et Pellerin, 2017b). Ces différentes initiatives élaborent des feuilles de route, cherchent à définir et promouvoir l'apport de nouvelles technologies au sein de l'industrie, avec un accent mis en premier lieu sur la production, notamment par des systèmes plus autonomes, plus flexibles, plus facilement reconfigurables avec une augmentation de la productivité et, *in fine*, avec une amélioration de la qualité possiblement accompagnée d'une diminution des coûts, et la concrétisation de la personnalisation de masse (Moeuf *et al.*, 2018).

Cette 4^{ème} révolution industrielle repose sur l'intégration de différentes technologies (Brandmeier *et al.*, 2016). La section suivante aborde ces dernières.

1.1.2 Des révolutions basées sur des technologies

Bien que nous n'ayons pas le même recul que pour les trois précédentes révolutions industrielles, la 4^{ème} révolution industrielle semble, comme les précédentes, s'appuyer sur une rupture technologique. Différents auteurs se sont intéressés à identifier les différentes technologies qui sont au cœur de la 4^{ème} révolution industrielle. Rüßmann *et al.*, dans leur rapport publié par le *Boston Consulting Group*, considèrent que la 4^{ème} révolution industrielle

repose sur neuf technologies qui transforment la production industrielle. Ces technologies de transformation sont les robots autonomes, la simulation et le jumeau numérique, l'intégration horizontale et verticale des systèmes, l'internet industriel des objets (IIoT), la cybersécurité, l'infonuagique (*Cloud Computing*), la fabrication additive, la réalité augmentée et enfin les mégadonnées et leur analyse (*Big Data*). Sur la base de cette proposition, Danjou *et al.* ont constitué dix groupes technologiques que sont les données massives, l'intelligence artificielle, l'infonuagique, l'Internet des objets (IdO), les systèmes cyber-physiques (SCP), la cybersécurité, les robots et machines autonomes, la communication inter-machines (*Machine-to-Machine*, M2M), les systèmes de simulations, et la réalité augmentée. La combinaison de ces différents groupes technologiques permet de soutenir le déploiement d'une stratégie numérique au sein des entreprises (Danjou, Rivest et Pellerin, 2017b ; Danjou, Rivest et Pellerin, 2017a).

Ces différents groupes technologiques sont cependant hétérogènes de par la granularité des technologies proposées, voire par leur nature. Ainsi, des technologies, des enjeux ou tendances et des facilitateurs semblent listés ici. Par exemple, la communication machine à machine (M2M), peut difficilement être considérée au même niveau que l'IdO, le premier pouvant faciliter la réalisation du second. D'une manière générale, nous considérons dès lors que ces groupes technologiques sont davantage à considérer comme des moyens d'implémentation tels qu'évoqués par (Moeuf *et al.*, 2018).

Nous percevons le numérique – regroupant le traitement, l'analyse et l'usage des données – et la connectivité – réseaux, échange de données – comme les dénominateurs communs de ces moyens d'implémentation, ce qui confirmerait la place de la 4^{ème} révolution industrielle au sein de l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire. Selon notre compréhension, la 4^{ème} révolution industrielle serait un paradigme industriel et technologique plaçant les technologies du numérique et de la connectivité au cœur des entreprises afin de tirer un meilleur avantage des moyens de production, des produits manufacturés, de leur développement et de leurs services associés (Guérineau *et al.*, 2018). En ce sens, certaines de ces technologies, en plus

d'améliorer la performance des processus industriels et de fabrication peuvent également se retrouver à d'autres niveaux dans l'entreprise. L'influence de la quatrième révolution industrielle dépasse le cadre de la production, tel que discuté ci-après.

1.1.3 Le développement de produits à l'heure de la 4^{ème} révolution industrielle

La quatrième révolution industrielle à travers le recours au numérique et à la connectivité est amenée à modifier l'organisation des entreprises sur plusieurs plans. Ces changements se propagent au-delà de la production et permettent aux entreprises d'entrevoir le développement de nouveaux modèles d'affaires, de services, et de produits (Hermann, Pentek et Otto, 2016 ; Brandmeier *et al.*, 2016 ; Ibarra, Ganzarain et Igartua, 2018 ; Anderl, 2014), avec des répercussions sur leur développement. Ce sont ces répercussions que nous discutons au cours de cette section.

À première vue, « l'Industrie 4.0 » a une connotation fortement orientée vers la production et la logistique. Dans cette logique, l'intégration de nouvelles technologies offre de nouvelles possibilités pour fabriquer certaines pièces et réaliser les assemblages. Par exemple, la fabrication additive peut permettre la multiplication des configurations possibles dans un objectif d'individualisation des produits. Par cet exemple, nous cherchons à montrer que cet apport de nouvelles technologies de production a une influence sur la façon de concevoir et industrialiser les produits. En conséquence, l'ingénierie des produits doit conjointement évoluer, tant au niveau du processus de développement des produits que de l'intégration de nouvelles technologies au sein de ces derniers.

Premièrement, au sein du processus de développement, ces technologies peuvent avoir un rôle direct et facilitateur. Au-delà du prototypage rapide, l'ingénierie virtuelle, soutenue par la conception assistée par ordinateur (CAO), la réalité virtuelle et augmentée, mais également la simulation numérique, permettent de prototyper et tester différentes solutions rapidement et à coûts réduits, parfois en impliquant l'utilisateur final, ce qui permet de converger plus

rapidement vers un produit final (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; Ovtcharova, 2010). De même, l'intégration des systèmes d'information et des données provenant des différentes sources au sein de l'entreprise, réalisée à travers des solutions d'infonuagique permettent de soutenir l'intégration horizontale (Rüßmann *et al.*, 2015). En effet, la chaîne de valeur horizontale dans laquelle le développement de produits prend place aspire à plus de cohésion, d'intégration ou encore de collaboration afin de briser les silos (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016). S'appuyant également sur les technologies de l'information, l'approche *Product Lifecycle Management* (PLM) joue un rôle facilitateur, en favorisant la collaboration entre les équipes, et en structurant l'information autour du produit et des étapes de son cycle de vie (Paviot, 2010). Enfin, des données peuvent également être collectées et analysées en rapport avec le processus de développement de produits. Cela pourrait permettre, outre de mesurer l'efficacité du déroulement du développement de produits au sein de l'entreprise, d'améliorer les pratiques (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016).

Deuxièmement, l'intégration de ces technologies au sein de produits traditionnels peut également avoir un effet de complexification du développement. En effet, par l'implication des nouvelles disciplines, le développement de produits doit faire face à de nouveaux défis. Ces derniers s'ajoutent aux contraintes précédemment évoquées de diminution de temps et des coûts, et d'augmentation de la personnalisation, de la performance et de la qualité. En ce sens, différents auteurs s'accordent sur la nécessité d'adapter la manière de conduire le développement de produits pour s'inscrire dans la 4^{ème} révolution industrielle (Rauch, Dallasega et Matt, 2016 ; Herzog et Bender, 2017 ; Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; Ganzarain et Errasti, 2016 ; Rüßmann *et al.*, 2015). Par exemple, Schuh *et al.* préconisent la prise en considération de l'Industrie 4.0 dès les premières étapes du développement (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016). Cependant la nature et l'ampleur de ces modifications varient d'un auteur à un autre.

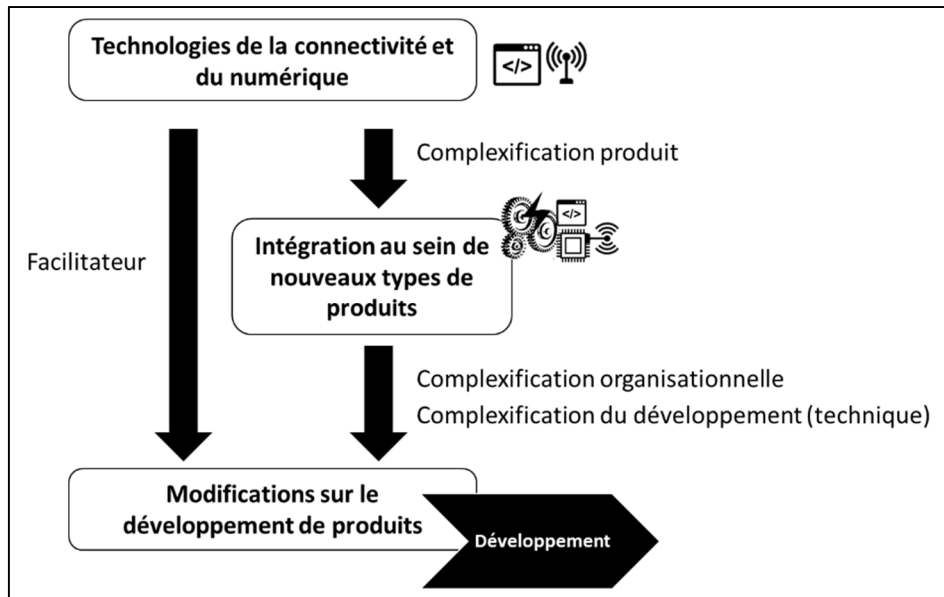


Figure 1.1 Rôles facilitateur et complexificateur des technologies du numérique et de la connectivité sur le développement de produits

La Figure 1.1 synthétise l'évolution du développement de produits à l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire sous deux impulsions. La première est facilitatrice et relative à l'usage d'approches, de techniques et méthodes permettant au développement de produits d'être plus performant. La seconde est source de complexité et a trait à l'intégration de nouvelles technologies au sein des produits. C'est sur cette seconde source de changements que nos travaux se concentreront. Dans la section suivante, le développement est défini, puis différents modèles de processus de développement de produits sont présentés et analysés afin de préciser le positionnement de nos travaux.

1.2 Définition et organisation du processus de développement de produits

Le développement de produits tel que nous l'entendons dans nos travaux peut être perçu comme une étape fondamentale du début du cycle de vie du produit – *Beginning of Life* (Terzi *et al.*, 2010 ; Vajna *et al.*, 2005), tel qu'illustré par la Figure 1.2. Cette vision du développement, étape du cycle de vie du produit, est également partagée par Ullman (2009) dans un contexte d'ingénierie de produits mécaniques, ou par l'EIA dans un contexte

d'ingénierie système (Electronic Industries Alliance - EIA, 1999). On notera toutefois sur la Figure 1.2 que Terzi *et al.* (2010) emploient le terme de « design », que nous comprenons dans le sens de « développement », notamment pour le produit. En effet, pour Vajna *et al.* (2005) le terme de développement de produits est à distinguer de la conception – *design* – qui peut être considéré comme un sous-processus du développement de produits. Nous retiendrons la définition de développement de produits suivante :

The area, in which the global and complete product model is developed from the first idea (or market needs) and its appropriate requirements to the complete documentation of all further steps within the lifecycle of the product.
(Vajna *et al.*, 2005)

Sur la base de cette définition et dans le cadre de nos travaux, le développement de produits, concerne l'ingénierie des produits ayant une dimension tangible (physique ou matérielle), de l'identification des besoins jusqu'au prototype documenté de production. L'accent n'est cependant pas mis sur l'optimisation, les tests ou encore la simulation numérique.

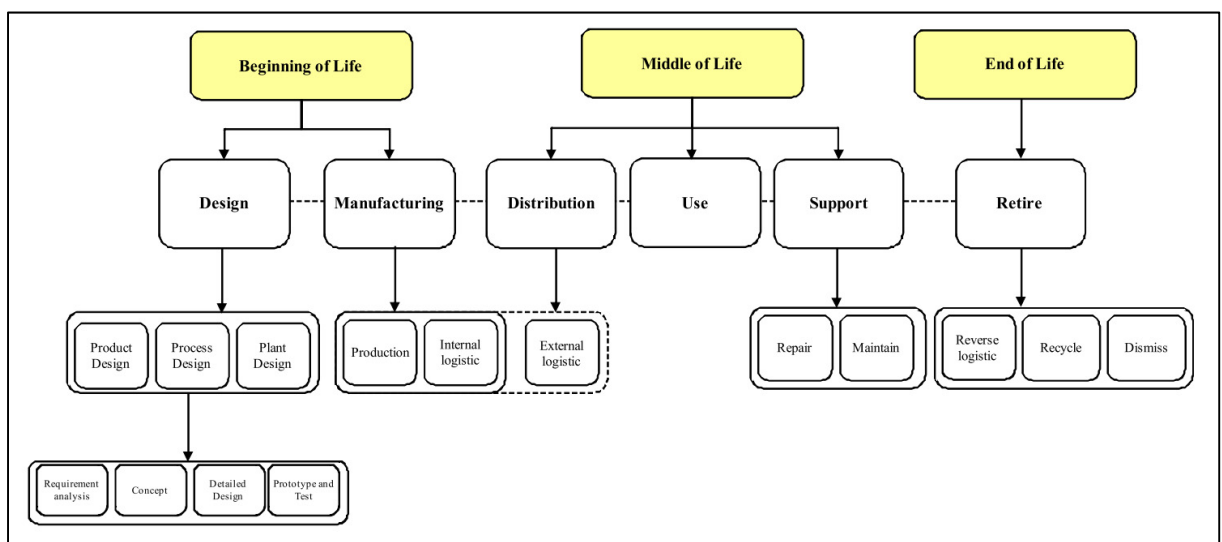


Figure 1.2 Représentation du cycle de vie du produit et positionnement du développement
Tirée de Terzi *et al.*(2010)

Le résultat du développement est communément appelé un produit (Krishnan et Ulrich, 2001 ; Araujo Jr, 2001 ; Ullman, 2009). Dans notre contexte, le terme de « système » peut parfois être employé, cependant c'est le terme « produit » que nous conservons pour nos travaux. En effet et en accord avec Abramovici, le spectre du terme produit est plus englobant. Il s'étend du simple composant aux systèmes complexes, incluant ainsi des produits de différentes tailles et fabriqués dans des quantités différentes (Abramovici, 2015).

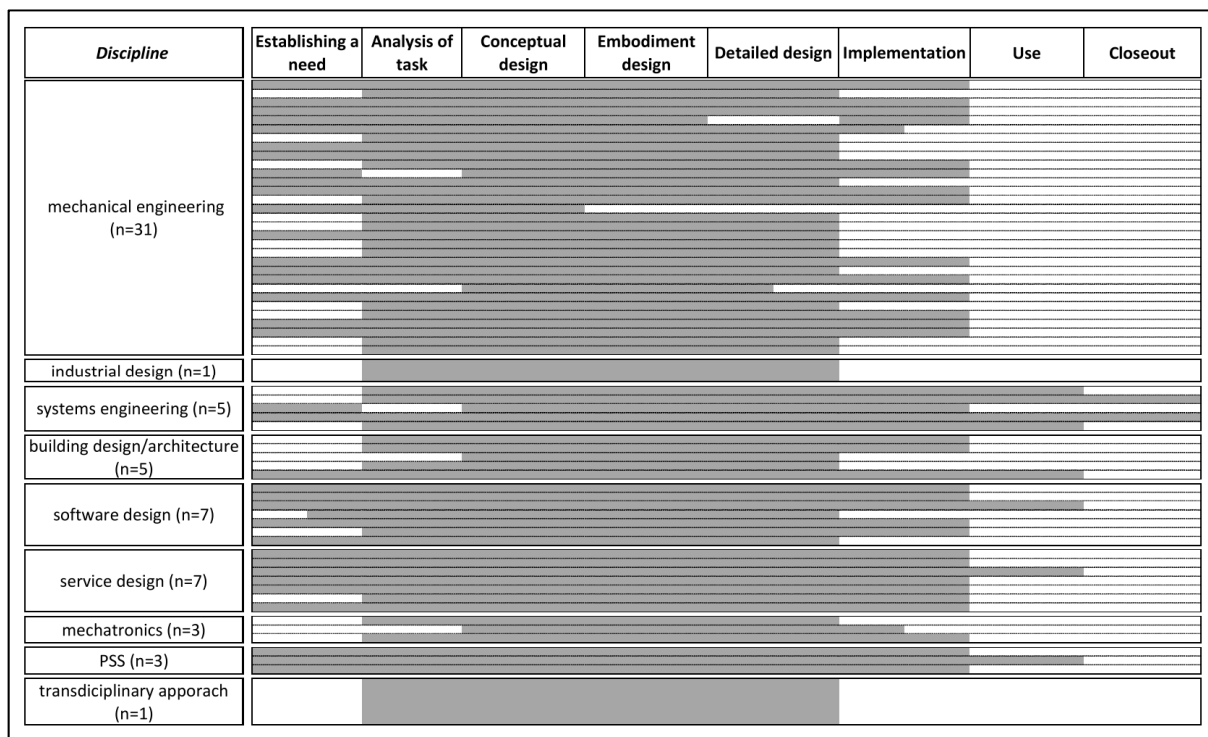


Figure 1.3 Comparaison des modèles de processus de développement issus de différentes communautés et pour le développement de différents types de produits
Tirée de Gericke et Blessing (2012)

Pour être mené à bien, le développement de produits peut s'appuyer sur un phasage généralement représenté par une vue processus et des modèles associés. Un des modèles de processus prescriptif répandu est celui de Pahl et Beitz, décrivant une approche systématique du développement (Kannengiesser et Gero, 2017 ; Pahl *et al.*, 2007 ; Wynn et Clarkson, 2005). Ce modèle de processus aurait influencé le VDI 2221 ou encore le modèle d'Ullman selon

(Kannengiesser et Gero, 2017 ; Vajna *et al.*, 2005). Cependant, il existe une multitude de modèles de processus venant appuyer le développement de produits, avec différents phasages variant ainsi en fonction du type de produit à développer, mais également en fonction des communautés, qu’elles soient d’ingénierie mécanique, système, logicielle.

Ainsi, certains auteurs se sont attardés à répertorier, analyser et comparer certains de ces modèles de processus (Wynn et Clarkson, 2005 ; Crnkovic, Asklund et Dahlgvist, 2003 ; Gericke et Blessing, 2012 ; Howard, Culley et Dekoninck, 2008). Crnkovic, Asklund et Dahlgvist (2003) s’intéressent à la comparaison des processus de développement génériques pour le logiciel et le matériel, traduisant l’influence du produit à développer sur le phasage et le modèle utilisé. Nous pourrions également citer les travaux de (Gericke et Blessing, 2012) comparant 82 modèles de processus, ou encore les travaux de (Howard, Culley et Dekoninck, 2008) comparant et analysant 23 modèles de processus majoritairement en lien avec l’ingénierie mécanique. Représentés sur la Figure 1.3, les modèles de processus analysés par Gericke et Blessing incluent des modèles pour l’ingénierie mécanique, logicielle, système, la mécatronique, le design industriel, mais également pour la transdisciplinarité, la construction, les services et les systèmes produit-service (PSS) (Gericke et Blessing, 2012). En analysant ces modèles de processus, la majorité listée par les deux études couvre quasi systématiquement les phases de *conceptual design*, *embodiment design* et *detailed design*¹¹, propres au découpage réalisé par (Pahl *et al.*, 2007). C’est donc majoritairement sur ces trois phases du développement que nous nous concentrerons. La section suivante expose le rôle primordial du développement dans le cycle de vie du produit, motivant son étude dans le cadre de nos travaux.

1.3 Le rôle prédominant du développement de produits

Le développement de produits est un processus complexe jouant un rôle clé dans les entreprises (Vajna *et al.*, 2005), voir stratégique (Cagan et Vogel, 2002). C’est une étape qui représente

¹¹ Au sein de la littérature, on retrouve parfois l’écriture « detail design ». La figure 1-3 utilise « detailed design ».

un investissement financier et un risque pour les entreprises. Selon Vajna *et al.* se référant aux travaux de Wiendahl, c'est au cours du développement que toutes les propriétés du produit, et jusqu'à 85% des coûts sont spécifiés (Vajna *et al.*, 2005 ; Mohebbi, Achiche et Baron, 2018). De plus, les possibilités d'influencer les coûts diminuent au cours du développement (Ehrlenspiel, 2014 ; Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; International Council on Systems Engineering, 2007 ; INCOSE, 2015), notamment les coûts de fabrication et d'assemblage (Ullman, 2009). Cela est illustré par la Figure 1.4 à travers la mention des coûts engagés sur le haut de la figure opposés aux coûts réels dans les barres d'histogrammes (INCOSE, 2015). À ce titre, Ullman fait état qu'une bonne conception peut réduire le coût du produit de 35%, pouvant aller jusqu'à 75% dans certaines industries. Dans le domaine des produits logiciels, développement et production étant fortement confondus, on comprend que le développement représente une partie importante des coûts. De plus, pour les produits matériels environ 75% des coûts de fabrications sont engagés à la fin de la phase de *conceptual design*. En outre, les erreurs non résolues – parfois dénommées dette technique – dans les phases amont du développement peuvent en effet engendrer une re-conception coûteuse (Vajna *et al.*, 2005 ; INCOSE, 2015) et ce peu importe le type de produit, matériel ou logiciel. Comme le décrit Ullman, une erreur ou une modification effectuée au début de l'ingénierie et coutant 1000\$, en coutera 10 000\$ si corrigée pendant le raffinement, et 1 000 000\$ si corrigée après le lancement en production (Ullman, 2009). Ce coût de correction des erreurs peut être retrouvé au sein de l'INCOSE (2015) et est illustré sur la Figure 1.4, le long de la flèche grise en diagonale. L'importance de la phase de *conceptual design* est également appuyée par (Araz et Erden, 2014 ; Mohebbi, Achiche et Baron, 2018 ; Hehenberger *et al.*, 2010). Dans le cadre d'un développement de produits totalement nouveaux, Hehenberger *et al.* soulignent à la fois l'importance et la difficulté du *conceptual design*. C'est en effet au cours de cette phase que les concepts de produits sont déterminés, figeant une partie de la conception. Cette phase conditionne le succès potentiel du futur produit (Hehenberger *et al.*, 2010). C'est également au cours des premières phases du développement que l'entreprise peut innover et générer différents concepts qui permettront à l'entreprise de se distinguer (Vajna *et al.*, 2005). En plus

du coût, le temps de mise sur le marché est également un critère de l'efficacité du développement (Clarkson et Eckert, 2005 ; Ullman, 2009 ; Araz et Erden, 2014).

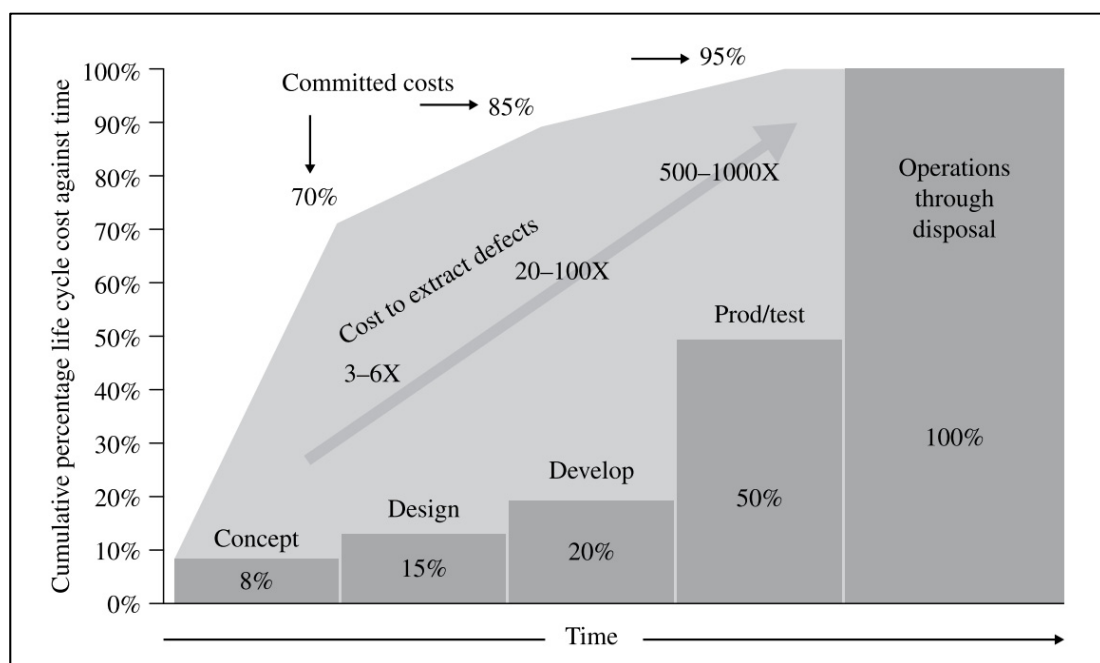


Figure 1.4 Illustration des possibilités d'influencer les coûts et de corriger les erreurs au cours du développement
Tirée de INCOSE (2015)

La majorité des décisions (architecture, solutions technologiques, dimensionnement, etc.) sont prises au cours du développement. Cette prise de décision s'appuie sur des connaissances de projets passés et les informations disponibles à l'instant t du projet. La prise de décision influence les différentes propriétés du produit final, mais reste l'affaire de compromis où l'optimum global prévaut sur les optimums locaux (Ullman, 2009 ; Pahl *et al.*, 2007 ; Clarkson et Eckert, 2005). Les paramètres de coût, de performance, de qualité, d'ergonomie, de fiabilité ou encore de robustesse et de résilience du produit dépendent du développement. Enfin, différents aspects du cycle de vie sont également déterminés au cours du développement, comme la maintenabilité, le désassemblage et le recyclage. C'est donc l'importance stratégique du développement, son influence sur le reste du cycle de vie du produit et son rôle stratégique

dans l'entreprise qui nous poussent à nous focaliser sur le développement et plus précisément, sur les phases de *conceptual design*, et subséquentes d'*embodiment design* et de *detailed design*.

Après avoir défini le développement de produits, les phases auxquelles nous nous intéressons, et après avoir démontré son rôle clé dans le cycle de vie du produit, la section suivante s'intéresse au lien d'influence entre le produit et l'organisation du développement, se traduisant en une structure de processus, méthodes et outils.

1.4 Le lien entre le produit, son développement et la structuration du développement de produits

Comme nous avons pu le voir dans la section 1.2, le processus de développement de produits et son phasage sont influencés par les communautés dont il émerge (Gericke et Blessing, 2012 ; Howard, Culley et Dekoninck, 2008). Ainsi, le modèle de processus d'ingénierie mécanique diffère du processus d'ingénierie logicielle (Blanchard et Fabrycky, 1990 ; Crnkovic, Asklund et Dahlqvist, 2003). En d'autres termes, le développement d'un logiciel n'appelle pas le même phasage qu'un produit tangible. Ce constat d'un lien entre un produit et son processus de développement émerge de l'analyse de travaux présentés par Ulrich et Eppinger (2016) qui spécialisent le modèle de processus générique en fonction du produit et du contexte de développement. Bien qu'intégré dans différents travaux, ce lien demeure peu formalisé et peu de travaux explicitent la réciprocité et l'influence du processus sur le produit et vice-versa (Eckert et Clarkson, 2005). Eckert et Clarkson figurent parmi les quelques auteurs qui ont explicité ce lien et mentionnent à ce sujet que le « processus de conception doit être adapté au produit en cours de développement », complété par les apports des relations avec les utilisateurs et les équipes de développement, tel qu'illustré par la Figure 1.5. Dans une direction similaire, Robin et Girard (2010) semblent formaliser ce lien bidirectionnel entre le produit et le processus et soulignent l'évolution conjointe du processus de développement et du produit. Plus récemment, ce lien a été réaffirmé par Paetzold (2017) dans un contexte multidisciplinaire. Selon notre compréhension, ce lien dépasse le processus et peut être décliné pour les méthodes

et outils qui sont davantage ancrés dans la technique et la pratique que le processus, donc davantage susceptibles d'évoluer avec le produit et ses caractéristiques.

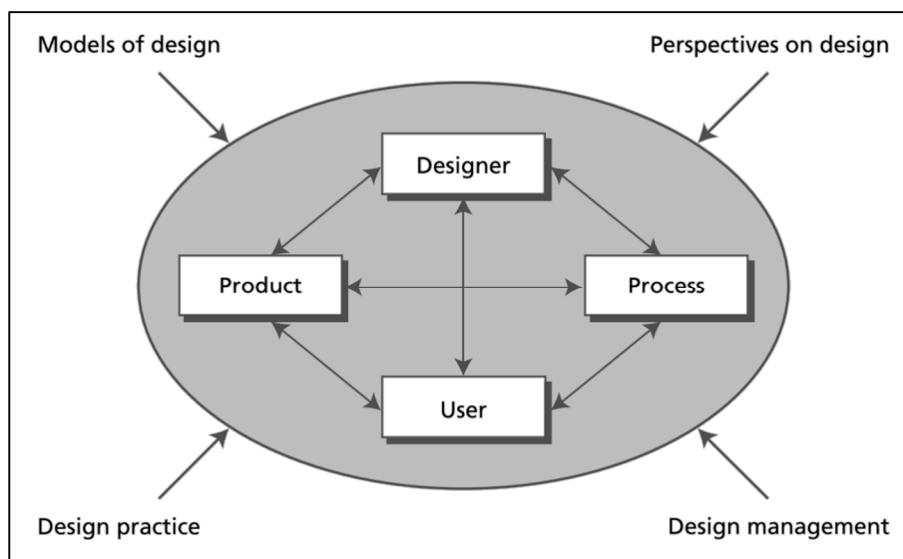


Figure 1.5 Liens entre le produit et le processus de développement, les concepteurs et les utilisateurs
Tirée de Eckert et Clarkson (2005)

En parallèle, différents auteurs insistent sur la nécessité d'employer des processus, méthodes et outils afin d'appuyer différents aspects du développement (Cagan et Vogel, 2002 ; Albers *et al.*, 2014 ; Gendron *et al.*, 2011 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Lindemann, 2003 ; Nijssen et Frambach, 2000), leur application permettant, entre autres, d'atteindre un développement plus performant (Franke *et al.*, 2009 ; Yeh, Pai et Yang, 2010). Le processus bénéficiant du soutien des méthodes, s'appuyant elles-mêmes sur des outils (Gendron *et al.*, 2011 ; Albers *et al.*, 2014), il est possible d'entrevoir une structuration hiérarchique. Cette structuration hiérarchique en processus-méthode-outil peut être rencontrée dans les travaux de Vajna (2005), qui défend un gain en productivité par une organisation plus méthodique du développement. La formalisation d'une structuration hiérarchique du développement permet, à notre sens, d'organiser l'échange d'informations entre le processus, les méthodes et les outils employés. Les résultats de l'outil étant ainsi exploités au niveau de la méthode, qui peut elle-même échanger des résultats avec d'autres méthodes et contribuer ainsi à l'avancement du processus.

Cependant, en pratique, Albers *et al.* (2014) et López-Mesa (2003) observent un manque d'intégration entre les processus de développement de produits et les méthodes utilisées, et donc une absence de structuration.

Dans la suite de nos travaux, l'ensemble des processus, méthodes et outils permettant de structurer le développement de produits sont regroupés sous la dénomination de **concepts et techniques**. La « **structuration** » quant à elle fait référence à la manière d'organiser et de soutenir le développement par une hiérarchie de concepts et techniques. Cette structuration fait ainsi office d'interface entre le produit et la manière d'organiser son développement. Par ailleurs en lien avec la section 1.3 qui a présenté le rôle majeur du développement, on comprend l'importance du choix de la structure pour conduire ce dernier.

<p>Structuration : manière d'organiser et de soutenir le développement par une hiérarchie de concepts et techniques.</p>

Sur la Figure 1.5, on observe également un lien avec les praticiens. Bien que ces derniers utilisent ces concepts et techniques à travers leurs connaissances, expériences, motivations, émotions et créativité (Vajna *et al.*, 2005), le volet « humain » n'est pas directement traité dans nos travaux. Il peut être opportun de souligner que nos travaux ne portent pas non plus sur l'organisation ou l'architecture des entreprises.

Bien que possiblement sous-jacent à plusieurs travaux de recherche, le lien entre le produit et la structure de concepts et techniques associée pour soutenir le développement reste peu formalisé dans la littérature. Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons particulièrement à ce lien. En parallèle, l'évolution des produits est un point de départ possible dans la transformation de ce lien. La section suivante apporte un éclairage sur l'apport successif des différentes technologies qui ont permis aux produits d'évoluer vers des produits multidisciplinaires.

1.5 Des produits mécaniques aux produits multidisciplinaires

Contrairement aux révolutions qui sont caractérisées par un changement rapide, les produits ont continuellement évolué au cours du temps en lien avec l'apparition et le développement de nouvelles technologies, l'évolution du marché et des besoins client ou encore une nécessité d'innover et de dégager un avantage concurrentiel. Les produits ont ainsi pu bénéficier de l'apport de nouvelles technologies, mais également participer à leur gain en maturité et à leur évolution au cours des ères. Cette section vise à présenter trois analyses (Zheng, Xu et Chen, 2020 ; Isermann, 2002 ; Thebault, 2013) de l'évolution des produits, dans une perspective 1) mécatronique de 2) produits « augmentés » et 3) produits « intelligents » et « connectés ».

La première analyse de l'évolution des produits est issue des travaux d'Isermann (2002) et est représentée par la Figure 1.6. L'auteur a établi une chronologie où chacun des stades de l'évolution des produits est daté. L'évolution débute à la première révolution industrielle à la fin du 19^{ème} siècle avec des produits qui étaient alors purement mécaniques. L'apparition et le déploiement de l'électricité ont alors permis le développement de nouveaux produits. L'électricité s'est ensuite développée jusqu'à l'apparition de contrôleurs permettant la régulation et l'émergence du contrôle automatique appliqué aux systèmes mécaniques. Il s'en suit l'apparition de l'électronique qui a offert de nouvelles possibilités pour le contrôle des systèmes mécaniques et a permis l'expansion de l'automatisation. Par la suite, l'électronique analogique est devenue numérique et les premiers logiciels ont également fait leur apparition. Cela a permis la création des premiers robots industriels et des machines-outils à commande numérique. En complément, de nouveaux capteurs, actionneurs, mais également des microprocesseurs, ont mené au développement des premiers « systèmes mécatroniques ». Leur miniaturisation a également permis la création d'ordinateurs portatifs. L'évolution présentée par Isermann pourrait être extrapolée avec le développement du logiciel, les possibilités de dématérialisation et son importance croissante au sein des produits, ainsi que le développement d'interfaces homme-machine (IHM) permettant de développer des interactions

avec le produit. Les systèmes embarqués se développent également, esquisant les prémices des produits « intelligents » (Sàde, 1999), repris dans la deuxième analyse.

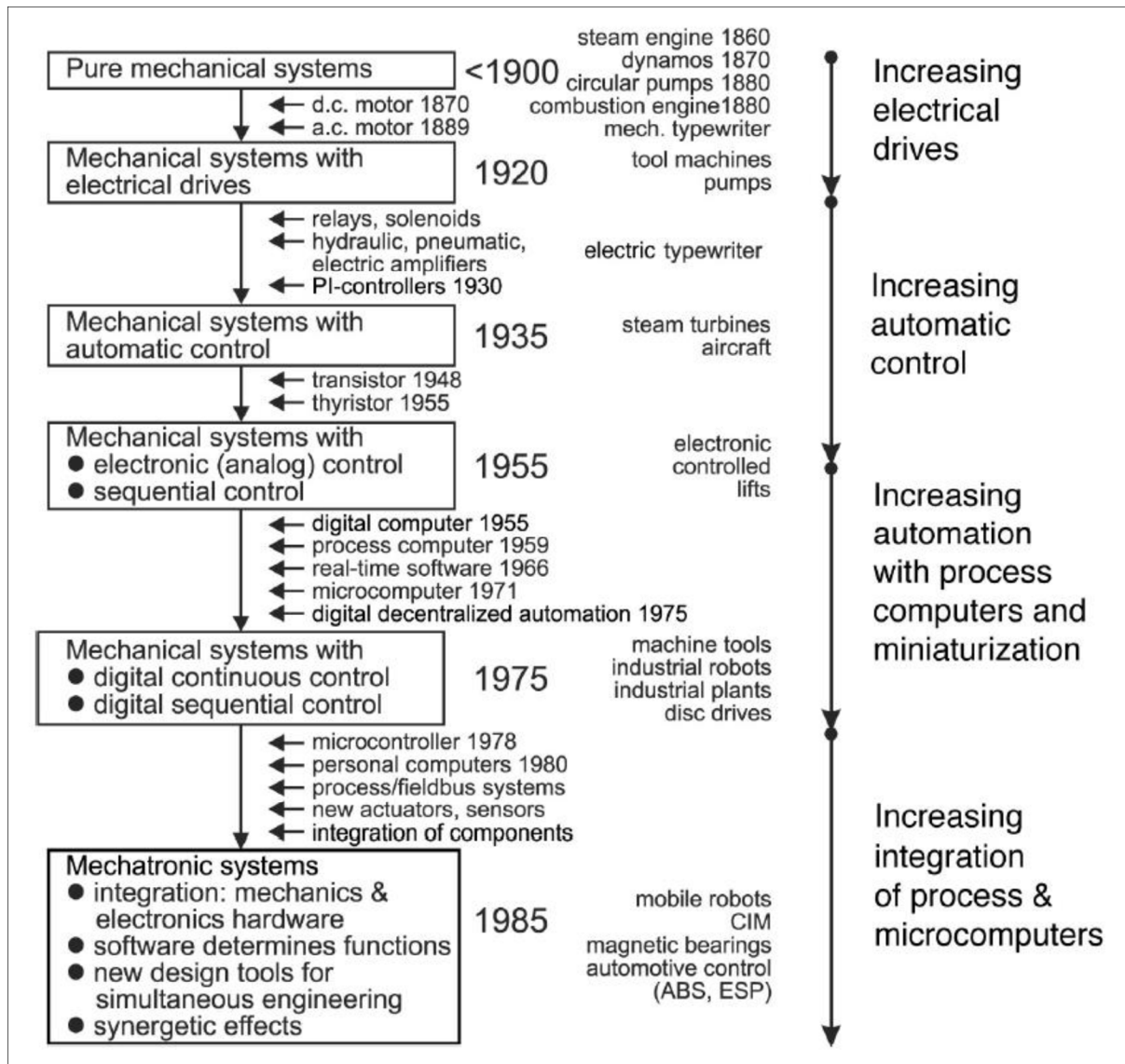


Figure 1.6 Évolution des systèmes purement mécaniques en systèmes mécatroniques
Tirée de Isermann (2002)

Le deuxième analyse, représentée par la Figure 1.7, est présentée par Thebault. Ce dernier se place dans la continuité de la chronologie établie par Isermann. Ainsi, les produits électriques

et électromécaniques ont évolué vers les produits électroniques intégrant des microcontrôleurs leur conférant des capacités de traitement de l'information, cependant limitées en regard des ordinateurs personnels de l'époque (Thebault, 2013). Ce stade pourrait correspondre à l'émergence des produits et systèmes mécatroniques. Enfin, au cours de la première décennie des années 2000 les produits connectés font leur apparition, permettant de connecter les produits à Internet et traduisant « la banalisation des ressources informatiques » (Thebault, 2013). Sur la base de la connectivité, Thebault prolonge cette évolution des produits avec le couplage entre produits et services Web donnant lieu à des produits dits « augmentés ». Ces produits « augmentés » sont des produits communément qualifiés aujourd'hui d'intelligents. Ces produits représentent le stade actuel de l'évolution et sont dotés de connectivité et de capacités de traitement de l'information avancées.

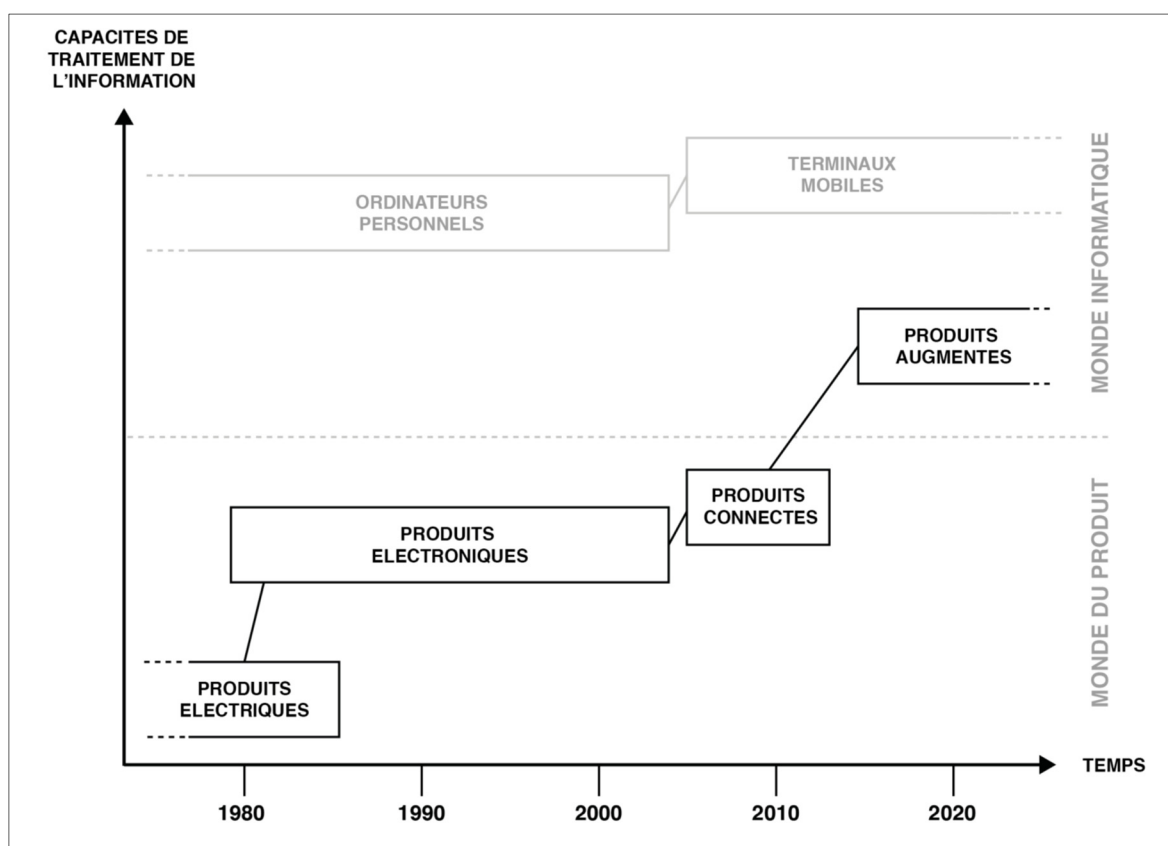


Figure 1.7 Évolution des produits électriques en produits intelligents
Tirée de Thebault (2013)

D'autres auteurs se concentrent sur cette dernière étape de l'évolution des produits et présentent des vues simplifiées. Ainsi, dans cette troisième analyse, Zheng *et al.* (2018) proposent une vue de l'évolution des produits traditionnels, dits « usuels », sur deux axes. Cette vue est illustrée par la Figure 1.8. Le premier axe est l'évolution de l'intelligence des produits réalisée par l'intégration de systèmes embarqués. Le second axe développe la connectivité des produits à travers l'intégration des technologies de l'information (TI). Cela démontre la tendance actuelle de l'évolution des produits, vers des produits « intelligents » et « connectés », et tend à appuyer par la même occasion notre point de vue concernant les deux grands axes technologiques de cette ère que sont le numérique et la connectivité.

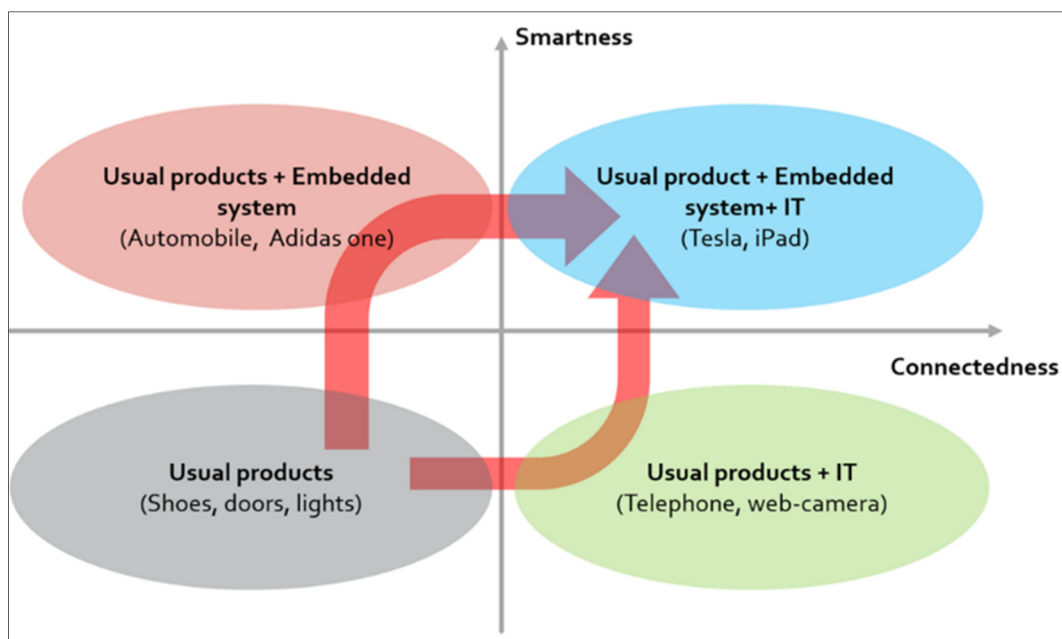


Figure 1.8 Le développement de produits vers « l'intelligence et la connectivité »
Tirée de Zheng, Xu et Chen (2018)

La combinaison de ces trois analyses offre une vue générale sur l'évolution des produits de la 1^{ère} à la 4^{ème} révolution industrielle. La Figure 1.9 synthétise notre compréhension de l'évolution des produits en parallèle de l'apparition des technologies ayant mené aux

révolutions industrielles et aux ères subséquentes. Ainsi, nous distinguons trois « ères ». La première est l'ère matérielle et traduit l'idée de produits se basant sur la mécanique, l'électricité ou encore l'électronique. L'apparition du logiciel et de l'informatique ont offert de nouvelles possibilités pour le développement de nouveaux produits et la réalisation des fonctions menant, selon nous, à une ère du logiciel. Enfin, le développement des infrastructures réseau et Internet, son expansion aux objets de la vie courante et aux moyens industriels, et le développement de nouvelles technologies de connectivité ont rendu cette dernière ubiquitaire. La conjonction de ces technologies avec le numérique, qui s'inscrit dans la continuité de l'ère précédente, nous permet de statuer que nous sommes actuellement au cœur de l'ère du numérique et de la connectivité.

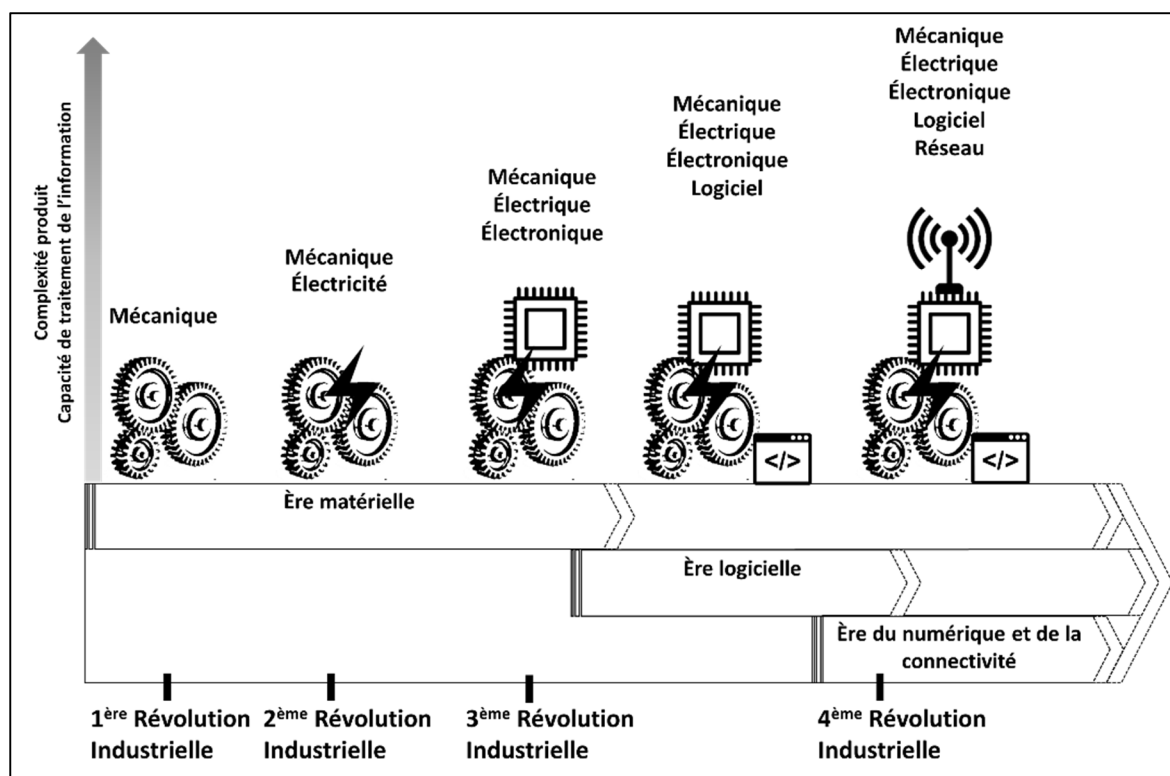


Figure 1.9 Vue de synthèse de l'agencement des révolutions industrielles, ères associées, stratégies d'intégration fonctionnelle et évolution des produits

En termes de disciplines impliquées, le stade actuel de l'évolution des produits repose sur l'intégration des disciplines mécanique, électrique, électronique, informatique et logicielle, ainsi que des réseaux et télécommunications, en faisant des produits qui sont par définition multidisciplinaires. Comme le soulignent différents auteurs, cette multidisciplinarité se justifie par l'augmentation conséquente des fonctions du produit, se traduisant en contrepartie par une augmentation de la complexité (Tomiyama *et al.*, 2019 ; Torry-Smith *et al.*, 2011), matérialisée par la flèche verticale. Les paragraphes suivants approfondissent la définition de la complexité, puis de la multidisciplinarité.

Cette complexité croissante des produits a été soulignée par différents auteurs (Mabrouk *et al.*, 2018 ; Kaul, Meyer et Sextro, 2017 ; Zheng *et al.*, 2019 ; Clarkson et Eckert, 2005). La complexité, appliquée à un produit ou une organisation, apparaît comme le fait que « l'interaction entre les constituants du système [produit ou organisation], et l'interaction entre le système et son environnement, sont d'une nature telle que le système dans son ensemble ne peut être entièrement compris par la simple analyse de ses composantes » (Cilliers, 1998). Dans notre cas, une partie de cette complexité émerge des multiples disciplines qui interviennent dans différentes proportions au sein du produit et au cours du développement et qui disposent de leurs propres spécificités qui doivent être prises en considération. De plus, le passage pour les entreprises d'un produit traditionnel à un produit multidisciplinaire peut être extrapolé comme étant le développement d'un nouveau produit, ou du moins une amélioration conséquente. Cela exclut donc possiblement la réutilisation d'une base existante du produit afin d'appréhender la complexité à travers une évolution graduelle comme le décrivent (Eckert et Clarkson, 2005).

Par la suite, l'appellation de « produits multidisciplinaires » fait référence à l'intégration des différentes disciplines nécessaires au développement de ces derniers – illustrés à droite sur la Figure 1.9. L'emploi du préfixe « multi » a ici été préféré aux préfixes « pluri » et « inter » pour les raisons présentées ci-après. Certaines distinctions apparaissent à travers l'usage de ces préfixes. D'après le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL), le terme

« pluridisciplinaire » semble être considéré comme un synonyme de « multidisciplinaire »¹². Ce point de vue semble également partagé par le Laboratoire interdisciplinaire littérature et mathématiques de l'Université de Sherbrooke¹³. Néanmoins, dans notre domaine de recherche qu'est le développement de produits, les termes les plus fréquemment rencontrés dans la littérature sont « interdisciplinarité » (Paetzold, 2017) et « multidisciplinarité » (Sadlauer et Hehenberger, 2017 ; Torry-Smith *et al.*, 2011). L'interdisciplinarité sous-entend un recoupement important entre les disciplines, voire une intégration. Or dans la pratique, le schéma multidisciplinaire semble prédominant et est représenté à travers une juxtaposition des disciplines, chacune conservant alors ses spécificités (Dussault, 1990). On assiste alors à un manque de communication et une organisation encore quelque peu « silotée » entre les disciplines, qui empêche d'entrevoir cette intégration interdisciplinaire (Bricogne, 2015 ; Den Hollander, 2015). La pluridisciplinarité, et par extension, la multidisciplinarité, sont alors définies comme « l'association de disciplines qui concourent à une réalisation commune, mais sans que chaque discipline ait à modifier sa propre vision des choses et ses propres méthodes », empruntée à Glykos par (Claverie, 2010). Toutefois comme le souligne Payette (2001), la multidisciplinarité n'empêche en rien les équipes à se détacher d'un fonctionnement en silos. Dans le cadre de nos recherches, la multidisciplinarité reste donc le terme employé.

1.6 L'évolution conjointe du produit et de la structure de développement associée

Dans les sections précédentes, des éléments de cadrage du contexte de nos travaux ont été introduits. Ces derniers sont synthétisés sur la Figure 1.10 et le cœur de nos travaux y est identifié par le cadre en pointillés.

Ainsi, nos travaux se positionnent dans un cadre général qu'est l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire associée (bandeau noir). Comme nous avons pu le voir précédemment,

¹² <https://www.cnrtl.fr/definition/pluridisciplinaire>

¹³ <https://www.usherbrooke.ca/litt-et-maths/fondements/inter-trans-multi-pluri-ou-intradisciplinarite/>

cette ère implique différents axes de transformation au sein des entreprises. Parmi ces axes, le développement de produits, regroupant trois phases que sont le *conceptual design*, *embodiment design*, et le *detailed design* (Pahl *et al.*, 2007 ; Gericke et Blessing, 2012), a été ciblé pour son rôle essentiel et son influence sur le reste du cycle de vie du produit (chevron noir). En parallèle, les technologies du numérique et de la connectivité s’immiscent au sein des produits, les amenant à évoluer vers des produits multidisciplinaires – représenté sur la partie basse de la Figure 1.10.

Comme nous avons pu le voir également, le développement s’appuie généralement sur différents concepts et techniques, qui demandent à être structurés pour être appréhendés et appliqués. La réalisation de cette structuration peut être basée sur différents facteurs, dont le produit à développer. En effet, il semble exister un lien entre le produit développé et la manière de conduire son développement (Eckert et Clarkson, 2005 ; Robin et Girard, 2010 ; Paetzold, 2017). La structuration des concepts et techniques, dans un premier temps considérée sur trois niveaux que sont processus, méthodes, et outils, est donc l’interface considérée dans nos travaux pour réaliser le lien entre le produit et son développement – lien produit-développement sur la Figure 1.10 (« organigramme » au centre de la figure). Par conséquent, l’évolution des produits présentée pourrait contraindre les entreprises à faire évoluer la structuration du développement, et de ce fait les concepts et techniques (processus, méthodes et outils) sur lesquels ils s’appuient (Robin et Girard, 2010 ; Eckert et Clarkson, 2005). Ainsi, l’objet de ces travaux réside dans l’accompagnement des entreprises traditionnellement monodisciplinaires qui souhaitent faire évoluer leurs pratiques en accord avec l’évolution de leurs produits. Il s’agit dès lors de structurer les concepts et techniques afin de soutenir le développement de produits multidisciplinaires, combinant connectivité, logiciel et matériel. Une partie du défi réside dans le fait que les concepts et techniques à destination des praticiens demeurent majoritairement monodisciplinaires (Gericke et Blessing, 2012). Il existe en effet peu de concepts et techniques dédiés à la multidisciplinarité. Néanmoins, nos travaux n’aspirent pas à proposer de nouveaux concepts et techniques pour la multidisciplinarité, mais à l’inverse d’utiliser les concepts et techniques existants au sein de la littérature, et auxquels

certaines pratiques peuvent être déjà formés, ou familiarisés avec leur usage. En effet, comme le font remarquer Gericke et Blessing, sur la base de travaux de Birkhofer, l'évolution des pratiques en profondeur ne signifie pas repartir d'une feuille blanche. Il est possible de s'appuyer sur certains travaux existants, parfois fragmentés, tout en effectuant une « consolidation » (Gericke et Blessing, 2012). La proposition d'une structuration cherche à rassembler des fragments existants, en mettant à profit les connaissances actuelles.

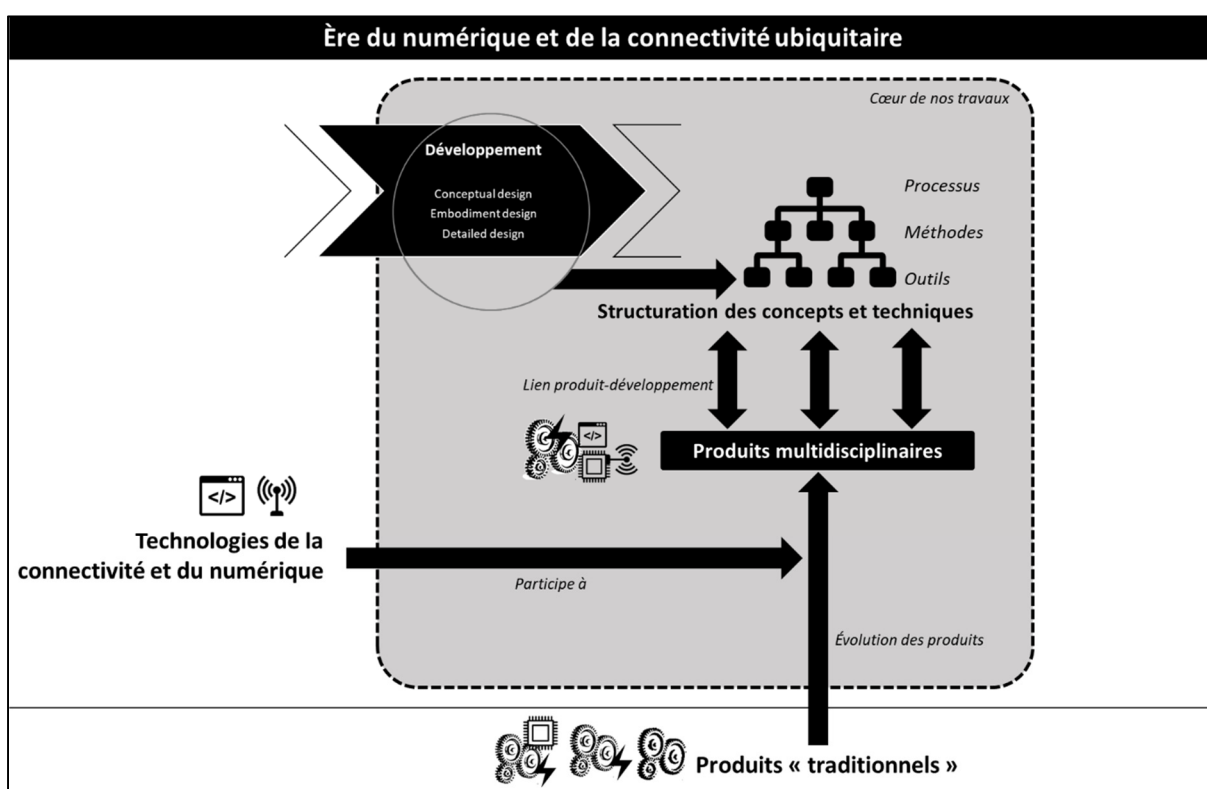


Figure 1.10 Synthèse du chapitre 1 : l'évolution conjointe des produits traditionnels en produits multidisciplinaires et de la structuration du développement associée

En résumé, nos travaux se concentrent sur le passage des produits « traditionnels » aux produits multidisciplinaires par les entreprises souhaitant s'inscrire dans l'ère de la connectivité et du numérique. La problématique de nos travaux s'inscrit dans la complexification des produits et porte sur les répercussions de la multidisciplinarité qui demeurent mal appréhendées au niveau du développement et de sa structuration par les industriels avec un héritage monodisciplinaire.

Problématique : Les industriels avec un héritage monodisciplinaire gagneraient à disposer d'une meilleure structuration des concepts et techniques pour mieux appréhender le passage au développement de produits multidisciplinaires.

La résolution de cette problématique passe par la compréhension des produits multidisciplinaires, de leur développement et de l'interaction produit-développement. Cette problématique fait également apparaître un volet pratiques industrielles et un volet littérature scientifique. Le volet pratiques industrielles évoque la manière dont les entreprises structurent actuellement les concepts et techniques mis en jeu dans leur développement de produits. Le volet littérature scientifique décrit et structure les concepts et techniques proposés par la littérature scientifique.

Par ailleurs, notre problématique et la suite de nos travaux s'appuient un postulat, déjà décrit et appuyé sur la littérature ci-avant. Ce dernier correspond à l'existence d'un lien entre les produits à développer et les concepts et techniques à mettre en place pour soutenir leur développement.

Le prochain chapitre met l'emphasis sur l'influence de la connectivité sur les produits, avant de présenter différentes terminologies utilisées au sein de la littérature scientifique pour qualifier les produits multidisciplinaires. Ce deuxième chapitre précise également la problématique à travers les objectifs de recherche et la méthodologie associée à nos travaux.

CHAPITRE 2

PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE DES TRAVAUX

Le chapitre précédent a présenté et agencé les différents éléments macroscopiques constitutifs de notre contexte menant à la formulation de la problématique à laquelle nos travaux cherchent à répondre. Le chapitre 2 affine certains éléments de positionnement de nos travaux. La première partie s'attarde sur les apports et défis soulevés par l'intégration de la connectivité au sein des produits et son implication pour le développement des produits. Sur une thématique proche, l'Internet des Objets est décrit en lien avec les produits multidisciplinaires. Dans la seconde partie du chapitre 2, nous présentons trois types de produits multidisciplinaires détaillés dans la littérature. Il s'agit des systèmes cyber-physiques (SCP), de la mécatronique et des produits dits « intelligents ». Les problématiques spécifiques liées à leur développement viennent en effet cadrer la problématique de nos travaux. Enfin, la dernière partie du chapitre 2 présente les objectifs de nos travaux, avant de présenter le cadre méthodologique adopté.

2.1 La connectivité : apports et défis pour les produits et leur développement

En 2014, le nombre d'objets connectés a dépassé la population mondiale (Laskier, 2017), suggérant le potentiel croissant de la connectivité et son intégration dans nos vies quotidiennes (Odini, 2016). Cette connectivité offre de nouvelles opportunités pour l'intégration de fonctions et capacités qui peuvent être déportées ou partagées avec d'autres produits, amenant à repenser l'intégration des fonctions et le périmètre du produit considéré lors de son développement. Par exemple, la connectivité permet aux industriels de déporter les calculs grâce à l'infonuagique – *cloud computing* – et bénéficier ainsi de traitements plus performants, lorsqu'une réponse en temps réel n'est pas essentielle. La connectivité offre également une possibilité de mise à jour à distance du produit et de proposer l'achat de *add-ons* pour personnaliser ou améliorer le produit. La mise à jour permet ainsi de mettre à jour le produit

vis-vis de son environnement, d'offrir de nouvelles fonctions et services, mais également de corriger d'éventuelles erreurs. Cette capacité de mise à jour doit également être prise en compte au niveau du matériel qui doit pouvoir accommoder certaines évolutions envisagées. Le flux de données inverse est également possible avec la récupération par les entreprises des données d'usage et de l'utilisateur. Cela permet d'avoir une meilleure compréhension de l'emploi du produit dans son environnement quotidien et donc d'améliorer l'expérience utilisateur liée à ce dernier, mais également les futurs développements de produits.

À l'opposé de ces apports, l'ajout de cette technologie complexifie généralement le produit et son développement. Par l'entremise de la connectivité, chaque produit devient alors le nœud d'un réseau et interagit avec d'autres produits, systèmes tiers et autres parties prenantes externes. Chacun de ces autres nœuds est indépendant du produit et peut être sous contrôle d'autres parties prenantes, ce qui induit qu'ils ont leur propre cycle de vie. De nouveaux nœuds peuvent ainsi apparaître, évoluer à travers des mises à jour, être remplacés, ou encore être supprimés. En ce sens, il est possible d'entrevoir le produit comme s'intégrant dans un système de systèmes – *system of systems* (SoS) – à travers le « caractère évolutif », « l'indépendance opérationnelle et managériale », une possible « distribution géographique » et la présence de « comportements émergents » (Maier, 1998 ; Jamshidi, 2011). Cela rend l'environnement du produit évolutif, instable et incertain, ajoutant ainsi un degré de complexité (Tomiya *et al.*, 2019). Le produit se doit donc d'être interopérable, résilient, reconfigurable et facilement maintenable, des aspects qui sont déterminés lors du développement. La connectivité soulève également la question de la cybersécurité, de l'éthique, et de la sensibilité des données échangées à travers le réseau. Les entreprises développant des produits connectés doivent prendre en compte ces aspects au plus tôt dans leur développement (Nyman et Främling, 2008 ; O'Halloran, Papakonstantinou et Van Bossuyt, 2018 ; Hughes et Cybenko, 2014 ; Weimer *et al.*, 2018 ; Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013). Enfin, au niveau matériel, la connectivité sans-fil peut impacter d'autres éléments du produit, tels que les matériaux utilisés qui peuvent réfracter les ondes, ou encore la compatibilité électromagnétique avec d'autres composants électroniques, complexifiant de ce fait le développement du produit.

Cette connectivité a joué un rôle dans la création de ce qui est défini comme une infrastructure de réseaux dynamiques, désormais qualifiée d'Internet des Objets et présentée dans la section suivante.

2.2 L'Internet des Objets

Bien avant la démocratisation du numérique et de la connectivité telle que nous la connaissons actuellement, différentes visions avaient conceptualisé de nouveaux paradigmes technologiques au sein desquels l'humain est au centre d'un « écosystème » d'appareils interconnectés et « intelligents » peuplant son environnement et avec lesquels il interagit. Parmi ces visions, nous en avons retenues trois, élaborées dans les années 1990, elles sont dénommées *Ubiquitous Computing* (Weiser, 1991 ; Weiser, 1999) – parfois abrégé UbiComp –, *informatique pervasive* (Thebault, 2013 ; Orwat, Graefe et Faulwasser, 2008 ; Olson, Nolin et Nelhans, 2015 ; Saha et Mukherjee, 2003), et intelligence ambiante (AmI) (Aarts et Encarnação, 2006 ; Poslad, 2009 ; Cook, Augusto et Jakkula, 2009 ; Aarts, 2004). Pour certains auteurs, l'UbiComp, l'AmI et l'*informatique pervasive* ont des similarités avec l'Internet des Objets (IdO) qui s'inscrit ainsi dans la continuité de ces concepts (Nolin et Olson, 2016 ; Kortuem *et al.*, 2010 ; Dohr *et al.*, 2010 ; Whitmore, Agarwal et Da Xu, 2015). D'autres auteurs voient en l'IdO une infrastructure pour le développement de l'UbiComp (Cáceres et Friday, 2012). La vision de l'UbiComp aspire à disposer d'informatique et d'information « anytime » et « anywhere » (Marwedel, 2018 ; Dohr *et al.*, 2010). Internet semble avoir introduit la dimension « anyone » (Dohr *et al.*, 2010). L'IdO rajoute la dimension « anything », allant jusqu'à être présenté comme une vision d'une connectivité « any-everything » (Nolin et Olson, 2016). En effet, Sundmaeker *et al.* décrivent l'IdO comme : « The Internet of Things allows people and things to be connected Anytime, Anyplace, with Anything and Anyone, ideally using Any path/network and Any service » (Sundmaeker *et al.*, 2010).

L'IdO, initialement apparu en 1999, conceptualisait l'usage de marqueurs RFID dans un contexte de *supply chain* en vue d'identifier et de tracer les marchandises (Cáceres et Friday,

2012 ; Uckelmann, Harrison et Michahelles, 2011). Comme le décrivent Niu, Anumba et Lu (2019), le concept a par la suite évolué pour intégrer des appareils dotés de capteurs et d'actionneurs, ayant également la possibilité de s'interconnecter et d'échanger de ce fait une plus grande variété de données. Puis, en lien avec l'UbiComp, la vision s'est étendue aux objets prenant la forme d'objets « intelligents ». Ces objets disposent alors de capacités de prise de décision en plus de la collecte de données et la capacité d'actions à travers les capteurs et les actionneurs. Ces objets peuvent être n'importe quel objet de la vie, forgeant ainsi le paradigme actuel de l'IdO (Niu, Anumba et Lu, 2019). Ce lien avec l'UbiComp, mais également l'AmI semble transparaître dans la définition de l'IdO proposée par (Giusto *et al.*, 2010) à travers l'omniprésence d'objets possiblement intelligents. Ce lien entre l'UbiComp, l'AmI et l'IdO est également souligné par (Miorandi *et al.*, 2012 ; Whitmore, Agarwal et Da Xu, 2015 ; Tomiyama *et al.*, 2019). Cette évolution décrit le point de vue « Objet » de l'IdO.

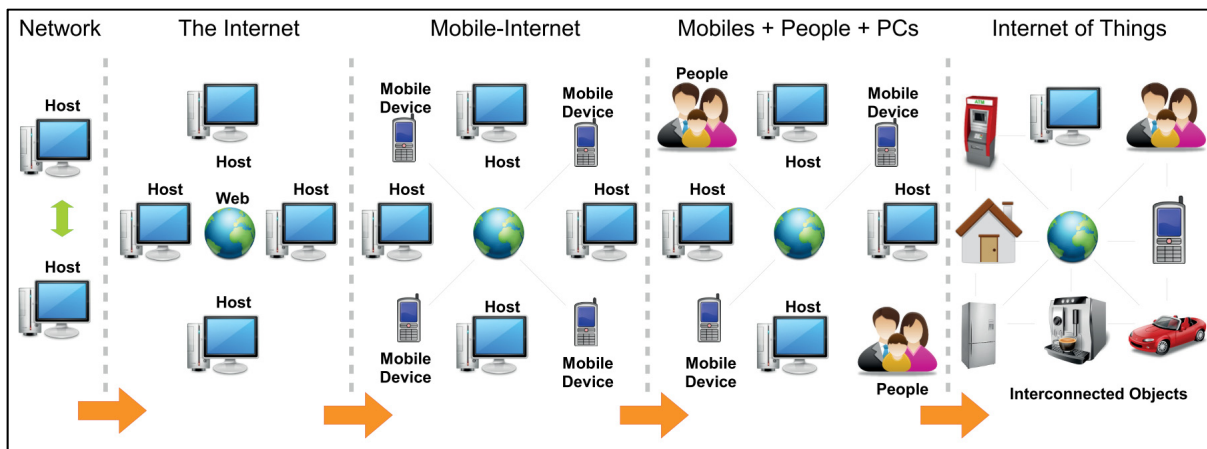


Figure 2.1 Évolution des premiers réseaux vers l'Internet des Objets
Tirée de Perera *et al.* (2014)

Dans une vision complémentaire « Internet » et réseaux, représentée par la Figure 2.1, Perera *et al.* (2014) mettent en exergue l'évolution progressive des premiers réseaux, qui ont engendré la création d'Internet à travers la connexion des ordinateurs, puis l'Internet-mobile basé sur la connexion des appareils mobiles à Internet, suivi par la mise en réseau des personnes à travers

les réseaux sociaux, pour aboutir à l'IdO (Perera *et al.*, 2014). Cette vision représente ainsi l'expansion progressive de l'Internet pour y intégrer les objets dotés de connectivité.

Ces visions « Objet » et « Internet » aboutissent à un réseau Internet étendu aux objets dont chacun possède des capacités de collecte, d'échange de données, de prise de décision et d'actions. Dans une vision fédératrice, l'IdO peut également être complété par une perspective « sémantique » (Atzori, Iera et Morabito, 2010). Ainsi, l'IdO se place à la convergence de ces trois vues, orientée « Objet », « Internet » et « sémantique » (Atzori, Iera et Morabito, 2010). Il n'existe pas de définition universelle de l'IdO, mais de nombreuses définitions ont été proposées (Giusto *et al.*, 2010 ; ISO, 2016 ; Sundmaeker *et al.*, 2010 ; Lee et Lee, 2015). Sundmaeker *et al.* (2010), dans un document du *Cluster of European Research Projects on the Internet of Things* (CERP-IoT), définissent l'IdO comme :

A dynamic global network infrastructure with self-configuring capabilities based on standard and interoperable communication protocols where physical and virtual 'things' have identities, physical attributes, and virtual personalities and use intelligent interfaces, and are seamlessly integrated into the information network.

Cette notion de réseau ou d'infrastructure d'objets, généralement physiques, semble être commune à différentes définitions (ISO, 2016 ; Lee et Lee, 2015 ; Kortuem *et al.*, 2010 ; International Telecommunication Union ITU, 2012), et regroupe les visions « Internet » et « Objet » précédemment discutées. De ce réseau peuvent également émerger des services, du traitement de données, des opportunités d'affaires et de marché (Miorandi *et al.*, 2012), mais leur intégration comme faisant strictement partie de l'IdO n'est pas tranchée. En effet, la notion de service n'apparaît que dans peu de définitions. À notre connaissance, seules les définitions du projet de norme ISO 30141 (ISO, 2016), et la recommandation de l'ITU-T Y.4000/Y.2060 (International Telecommunication Union ITU, 2012) mentionnent la notion de service.

D'un point de vue plus pragmatique, l'IdO et, d'une manière générale, l'ubiquité de la connectivité, ont été rendus possibles grâce à un nombre de plus en plus important de technologies et protocoles de connectivité pour courte, moyenne et longue portée, ainsi que pour différents débits de données (Salman et Jain, 2016 ; Jara, Ladid et Skarmeta, 2013). On pourra citer le WiFi, NFC, RFID, 6LoWPAN, UWB, WiMax, ZigBee, LoRa, SigFox, Weightless (-N, -P, ou -W), DASH7, le *Bluetooth Low Energy* (BLE) ou encore l'avènement de la cinquième génération de réseaux mobiles (5G) qui a pour but de soutenir le nombre croissant d'objets connectés et de permettre des débits élevés de données (Liu et Lin, 2019 ; Salman et Jain, 2016 ; Xu, He et Li, 2014). Ces différentes technologies permettent de couvrir une variété d'applications et d'usages, asseyant l'ubiquité de la connectivité. Le nombre croissant d'objets connectés est également accompagné d'une nouvelle version du protocole internet (IP) avec l'IPv6 en vue d'attribuer une adresse IP à chacun de ces objets, leur conférant ainsi une identité propre dans l'Internet (Jara, Ladid et Skarmeta, 2013 ; Olson, Nolin et Nelhans, 2015 ; Xu, He et Li, 2014). La connectivité offre ainsi la capacité aux produits d'être connectés alors que l'IdO offre l'infrastructure afin de soutenir les connexions et l'échange de données.

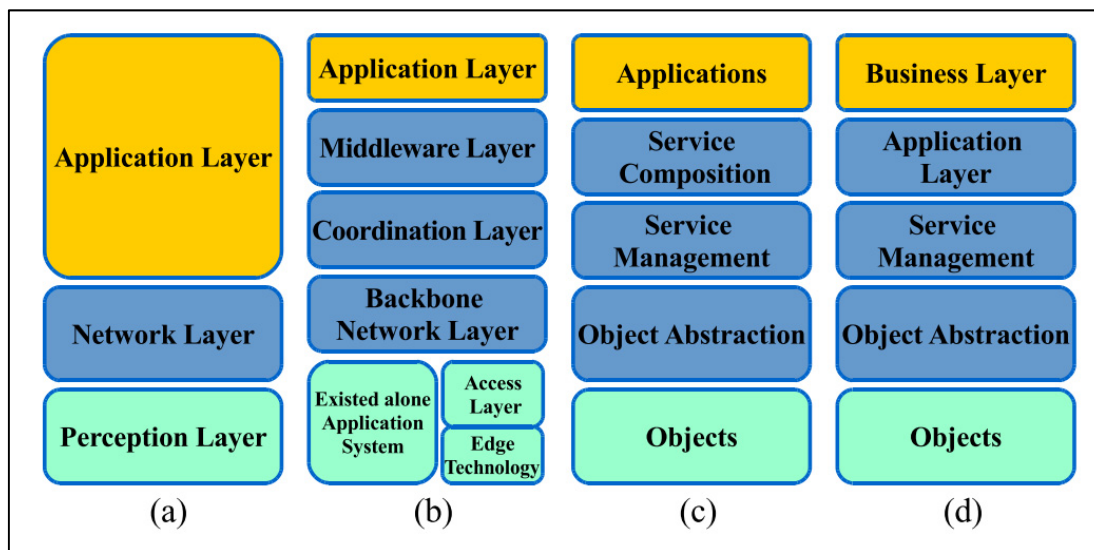


Figure 2.2 Représentation de quatre types d'architecture de l'Internet des Objets
Tirée de Al-Fuqaha *et al.* (2015)

Enfin, toujours d'un point de vue pragmatique, l'IdO est représenté par des architectures génériques. On retrouve au sein de la littérature des architectures en 3, 4 ou encore 5 couches (Al-Fuqaha *et al.*, 2015 ; Khan *et al.*, 2012 ; Fan et Chen, 2010 ; Xu, He et Li, 2014). Al-Fuqaha *et al.* présente quatre architectures de l'IdO que sont l'architecture en trois couches, l'architecture basée sur l'intergiciel, l'architecture orientée services, et l'architecture en cinq couches (Al-Fuqaha *et al.*, 2015). Ces dernières sont illustrées par la Figure 2.2. Le point commun de ces architectures types est la couche « perception » ou « objet ». Cette couche nous intéresse tout particulièrement, car c'est la couche composée par les objets « intelligents » et connectés.

Ces deux premières sections ont permis d'asseoir le caractère ubiquitaire de la connectivité. Par la suite, nous nous concentrerons sur cette vue « Objet ». En effet, nous nous intéressons aux produits qui forment les nœuds du réseau, que nous détachons de la vue « Internet » et de l'infrastructure associée. Les produits actuels qui aspirent à s'intégrer dans ce nouveau paradigme nécessitent l'intégration de capacités de connectivité. Cette intégration soulève néanmoins quelques enjeux, notamment pour les entreprises, avec une éventuelle refonte du périmètre fonctionnel du produit considéré et une remise en cause de son développement.

2.3 Les produits multidisciplinaires : le cœur de notre étude

Nos travaux s'intéressent au développement des produits représentant le stade actuel de l'évolution précédemment décrite au chapitre 1. Ces produits intègrent différents disciplines relatives 1) au matériel que sont la mécanique, l'électricité, l'électronique ; 2) à l'informatique et au logiciel ; et 3) à la connectivité et ses composantes matérielles (les puces de communication, les infrastructures de télécommunication) et informatiques (protocoles d'envoi et de réception des données). Ces différentes disciplines et leurs composantes principales sont décrites ci-après.

- La mécanique inclut la conception de produits mécaniques, hydrauliques ou encore pneumatiques et optiques, ainsi que le dimensionnement des structures, les matériaux et la prise en considération des aspects acoustiques et thermodynamiques.
- L'électronique et l'électrique (E/E)¹⁴ couvrent le développement de produits électriques et électrotechniques¹⁵, le développement de produits micro- et nano-électroniques, incluant les composants, les matériaux, mais aussi l'électronique de puissance et de traitement des signaux (analogiques et numériques), la photonique, l'optoélectronique, et la prise en considération des aspects électromagnétiques.
- L'informatique¹⁶ inclut le développement et l'architecture de logiciels, de systèmes d'exploitation, d'interfaces homme-machine, d'algorithmes, mais également l'automatique avec la commande, ou encore le traitement du signal avec la science des données, les traitements statistiques, la classification ou la segmentation des données.
- La connectivité et les équipements de télécommunication (désignés dans la suite du manuscrit comme la « connectivité ») se retrouvent parfois divisés entre l'électronique et l'informatique (voir sections CNU 61 et 63). Cette discipline s'intéresse au développement des infrastructures, à l'architecture de réseaux, à leur optimisation et à leur sécurisation, ainsi qu'à l'électronique permettant l'émission, la transmission et la réception du signal, sa compression, son codage et son traitement.

Chacune de ces disciplines est décrite ci-dessus de manière non exhaustive et leurs descriptions visent à préciser certains termes utilisés dans ces travaux. Ces disciplines ne sont pas à percevoir comme distinctes et peuvent s'entrecouper selon les communautés scientifiques. Diverses associations de ces disciplines sont présentes au sein de la littérature scientifique à

¹⁴ Description inspirée de la présentation de la section 63 du Conseil National des Universités (CNU) - <https://www.conseil-national-des-universites.fr/cnu/#/>

¹⁵ Au sens défini par le dictionnaire « Trésor de la langue française » : Relatif aux applications pratiques de l'électricité, à la science étudiant ces applications.

¹⁶ Description inspirée de la présentation de la section 61 du Conseil National des Universités (CNU) - <https://www.conseil-national-des-universites.fr/cnu/#/>

travers un certain nombre d'appellations que sont les systèmes cyber-physiques, les produits mécatroniques, ainsi que les produits intelligents et connectés, définis dans les sections suivantes.

2.3.1 Systèmes cyber-physiques

En 1948, Norbert Wiener introduisait le terme de « cybernétique » (Wiener, 1965). Ce terme fut initialement introduit en vue de nommer le domaine de la théorie du contrôle et de la communication pour les systèmes naturels et artificiels. Les travaux de Wiener ont eu une influence sur le développement de la théorie du contrôle. Sa notion du contrôle était basée sur un contrôle en boucle fermée, à travers la mesure des processus physiques, pour ensuite agir dessus (Lee et Seshia, 2015 ; Blanchard et Fabrycky, 1990). Selon Lee et Seshia (2015), cette logique de contrôle fait appel au traitement de l'information – *computation* – faisant de la cybernétique un domaine à la croisée des processus physiques, de la communication et du traitement d'information.

Plus d'un demi-siècle plus tard, en 2006, Helen Gill introduit le terme de *cyber-physical systems (CPS)*, les systèmes cyber-physiques (SCP) en français, lors du *National Science Foundation Workshop* aux États-Unis (Monostori *et al.*, 2016). Ce terme se réfère à l'intégration du traitement de l'information dans les processus physiques (Lee et Seshia, 2011). Les SCP sont définis comme :

A new generation of systems with integrated computational and physical capabilities that can interact with humans through many new modalities. The ability to interact with, and expand the capabilities of, the physical world through computation, communication, and control is a key enabler for future technology developments. (Baheti et Gill, 2011)

Parfois regroupées sous le sigle 3C, le **traitement de l'information** (*computation*), la **communication** et le **contrôle** sont trois capacités fondamentales des SCP (Cheng *et al.*,

2019 ; Baheti et Gill, 2011 ; Liu *et al.*, 2017 ; Kim et Kumar, 2012), et semblent être héritées de la cybernétique. Ces 3C sont également à mettre en relation avec les aspects dynamiques des processus physiques avec qui ils entretiennent un lien étroit (Rajkumar, 2012). Les SCP sont donc conceptualisés à travers l'idée d'un système virtuel, « cyber » composé des 3C, en lien étroit avec le monde physique et le contrôle de ses aspects dynamiques. Le système a donc une réalisation matérielle, « physique », par laquelle il interagit avec son environnement. Ces SCP peuvent se retrouver dans différents domaines tels que le médical, l'aérospatial, le transport, la défense, la construction ou encore au sein des industries manufacturières comme éléments de l'Industrie 4.0, comme évoqué dans le chapitre précédent (Rajkumar *et al.*, 2010 ; Darwish et Hassanien, 2018).

D'autres définitions et auteurs mettent en avant les caractéristiques et capacités de ces systèmes (Liu *et al.*, 2017 ; Zhu *et al.*, 2018 ; Rajkumar, 2012 ; Penas *et al.*, 2017 ; Choi *et al.*, 2017 ; Wang, 2018). Comme le souligne Penas *et al.* (2017), il existe de nombreuses définitions, cependant certains traits sont communs tels que l'intégration du traitement de l'information, la mise en réseau et les processus physiques. Ces trois traits communs rejoignent les 3C. Mais, au-delà des 3C, différents auteurs viennent y raccrocher d'autres capacités telles que *sensing* ou *actuation* (Choi *et al.*, 2017). Ces capacités favorisent l'interaction avec leur environnement et permettent ainsi la surveillance, l'analyse et la prise d'actions sur les processus physiques à travers des boucles de rétroaction (Zhu *et al.*, 2018). La collecte de données peut se faire sur les processus physiques à travers les capteurs, mais également à travers la mise en réseau et l'échange de données, laissant supposer une capacité de coopération entre les systèmes. Les SCP sont ainsi capables de s'organiser et de prendre des décisions autonomes (Penas *et al.*, 2017). Au-delà de ces différentes capacités et caractéristiques, une des spécificités permettant de justifier une distinction avec les autres produits multidisciplinaires, présentés par la suite, est la dimension d'intelligence décentralisée reposant sur des systèmes multi-agents (Darwish et Hassanien, 2018). Cette dimension de systèmes multi-agents semble ainsi être une caractéristique peu mentionnée, mais qui justifierait l'existence d'une appellation distincte de la mécatronique ou des produits intelligents, présentés par la suite.

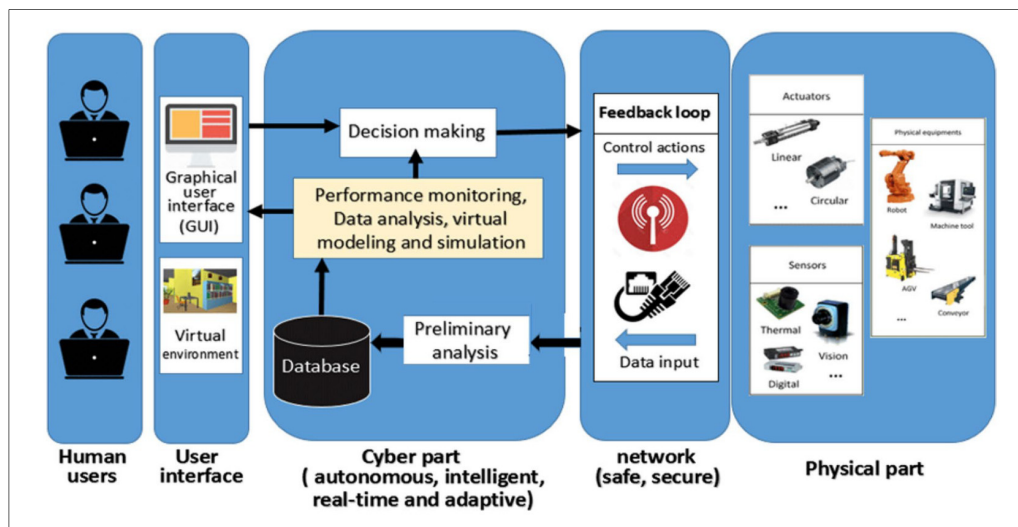


Figure 2.3 Architecture générique d'un système cyber-physique
Tirée de Darwish et Hassanien (2018)

Ces différentes capacités sont réalisées par l'intégration de composants organisés au sein d'architectures. La partie « cyber » est appuyée par des algorithmes et du logiciel et prend en charge le traitement de l'information et la prise de décision. Pour la partie « physique », la littérature aborde principalement des composants électroniques tels que les capteurs et actionneurs, ainsi que l'électronique pour la communication ou encore le traitement des données. À cela peuvent s'ajouter le stockage des données, le stockage et la transformation de l'énergie, ou encore une structure mécanique (Weimer *et al.*, 2018 ; Baheti et Gill, 2011 ; Carni *et al.*, 2017 ; Rajhans *et al.*, 2009 ; Paetzold, 2017), rendant les SCP multidisciplinaires. Ces différents composants sont ensuite agencés en vue de former une architecture telle que proposée par Darwish et Hassanien (2018) ou encore Liu *et al.* (2017). Bien que le niveau de détail soit plus fin dans l'architecture proposée par Liu *et al.* (2017), nous privilégions celle de Darwish et Hassanien (2018), représentée par la Figure 2.3, qui se veut plus générique et graphiquement plus facilement appréhendable (Darwish et Hassanien, 2018). En plus des composants précédemment cités, on retrouve possiblement une interface utilisateur et une représentation virtuelle de l'environnement, la « cyberisation » de l'espace physique (Lee, 2010).

Cependant, comme le fait remarquer Lee (2008), cette intégration entre processus physiques et « computing » n'est pas nouvelle. Les systèmes embarqués étaient le terme auparavant utilisé pour décrire « des systèmes combinant processus physiques et traitement de l'information » (Lee, 2008). Cette vision selon laquelle les SCP sont une extension, une amélioration, une évolution des systèmes embarqués est partagée par différents auteurs (Crnkovic *et al.*, 2016 ; Eva et Broy, 2015 ; Rúbio, Dionísio et Torres, 2019 ; Darwish et Hassanien, 2018). Cependant un des éléments différenciateurs serait notamment la mise en réseau et l'intégration de la connectivité (Dumitrache *et al.*, 2017 ; Sha *et al.*, 2009 ; Lee, 2008 ; Darwish et Hassanien, 2018). En lien avec la mise en réseau, d'autres concepts sont susceptibles de venir enrichir la compréhension de ce que sont les SCP, ou tout au moins leurs fondations. Ainsi, les *mobile ad hoc network* (MANET), les réseaux de capteurs sans fil – *wireless sensor network* (WSN) et les *wireless sensor and actuator network* (WSAN) – représentent des évolutions successives de réseaux intégrant des capteurs (WSN) puis des actionneurs (WSAN). Selon Li, Li et Asaeda (2014) les WSAN « consistent dans un grand nombre de dispositifs généralement petits, dont chacun intègre des capacités de détection, de traitement et de communication sans fil ». Ces réseaux de capteurs et d'actionneurs que sont les WSN et WSAN, constitueraient un des composants principaux des SCP (Li, Li et Asaeda, 2014 ; Hu *et al.*, 2016 ; Wu, Kao et Tseng, 2011 ; Darwish et Hassanien, 2018).

Cette vision semble partagée par Liu *et al.* (2017) qui voient les SCP comme « la transformation et l'intégration des systèmes réseau et des systèmes embarqués ». Enfin, pour Song *et al.*, (2019), l'emphasis est davantage sur les éléments « cyber » au sein des SCP qu'au sein des systèmes embarqués. L'importance, mais également l'héritage *software* est également soutenue par Bricogne (2015) pour qui les SCP sont historiquement des « cyber-systems » ayant trouvé une matérialité par laquelle interagir avec le monde physique. L'ensemble de ces différentes vues que sont les systèmes embarqués, les réseaux de capteurs, la théorie du contrôle, ou encore l'UbiComp et l'informatique pervasive sont réunies au sein des cyber-systems selon Rajkumar (2012) qui voit les SCP comme la confluence de différents domaines comme l'illustre la Figure 2.4.

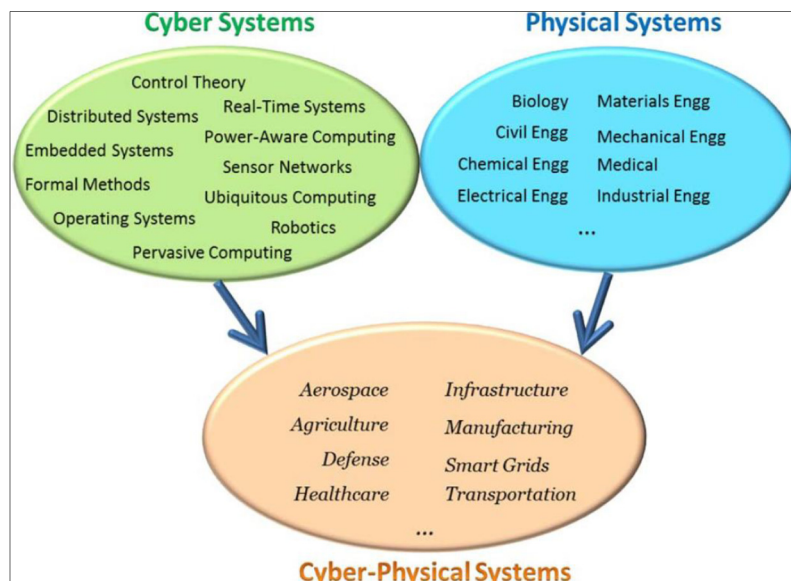


Figure 2.4 Les systèmes cyber-physiques à la confluence de différents domaines
Tirée de Rajkumar (2012)

Cependant, le développement de SCP semble plus complexe que celui des systèmes embarqués ou des réseaux de capteurs. Les SCP sont voulus plus performants, résilients, flexibles, autonomes, extensibles – *scalable* – ou encore distribués et n'en sont au final que plus complexes (Tan, Goddard et Pérez, 2008 ; Zhu et Sangiovanni-Vincentelli, 2018). Les SCP combinent alors diverses problématiques notamment de temps réel, d'incertitudes liées aux diverses erreurs possibles, de quantité et de variété de données, de contrôle, de limitation en ressources, ou encore de réseautique (Rajkumar, 2012 ; García-Valls, Perez-Palacin et Mirandola, 2018 ; Dumitrache *et al.*, 2017 ; Kim et Kumar, 2012). En regard de ces problématiques, certains de ces systèmes sont également impliqués dans la réalisation de tâches dont les conséquences peuvent être dramatiques en cas de défaillance, ajoutant un degré de difficulté supplémentaire. Ces systèmes doivent impérativement être sûrs, sécuritaires, et fiables dans leur fonctionnement, caractéristiques auxquelles se rajoutent des considérations de performance et d'efficience (Hasuo, 2017 ; Kim et Kumar, 2012 ; Rajkumar, 2012). En ce sens, la complexité structurelle et comportementale, et d'une manière générale la complexité intrinsèque des SCP, en sont tributaires (Dumitrache *et al.*, 2017). Différents auteurs entérinent

également cette complexité structurelle et comportementale, mentionnant par la même occasion leurs répercussions sur le développement (Kim et Kumar, 2012 ; Paetzold, 2017). D'une manière plus pragmatique, Paetzold (2017) souligne que cela soulève des défis pour le processus de développement, mais également les méthodes et les outils, traduisant de ce fait des répercussions sur la structuration du développement. Ainsi, les entreprises souhaitant développer ces produits peuvent être amenées à repenser différents aspects du développement de produits (Wang, 2018 ; Dumitrache *et al.*, 2017). Par conséquent, pour les entreprises développant des produits physiques et souhaitant développer des SCP, Broy et Schmidt (2014) préconisent « une approche d'ingénierie fondamentalement nouvelle ». À cela s'ajoute un manque possible de méthodologies pour gérer cette complexité et donc le besoin de développer de nouveaux processus, de nouvelles méthodes, de nouveaux outils, ou encore de nouveaux modèles pour accompagner le développement et améliorer sa performance (Darwish et Hassanien, 2018 ; Song *et al.*, 2019 ; Hehenberger, Howard et Torry-Smith, 2016). À ce titre, différents auteurs pointent l'importance de la modélisation système et de la simulation numérique comme éléments clés du développement des SCP, mais également l'importance des phases initiales du développement et par conséquent un besoin en méthodes axées sur la génération de concepts, l'évaluation et l'optimisation de solutions (Hehenberger, Howard et Torry-Smith, 2016 ; Kim et Kumar, 2012 ; Paetzold, 2017). Différents auteurs soulignent ainsi le manque d'adéquation entre les pratiques actuelles, traditionnelles, et celles à adopter ou à créer pour accompagner le développement de SCP et en appréhender la complexité.

2.3.2 Produits intelligents

Les « produits intelligents » ou « *smart products* » sont probablement les appellations les plus connues du grand public de par leur usage répandu pour caractériser divers produits de grande consommation actuellement commercialisés. Ceci a d'ailleurs pour effet de conférer à ces appellations une connotation marketing (Cronin, 2010). Néanmoins, différents auteurs ont tenté de proposer des définitions plus techniques. Ces différentes définitions proposent des vues génériques et haut niveau (Porter et Heppelmann, 2014 ; Anderl, Picard et Albrecht,

2013), axées sur les capacités et fonctions attendues (Mühlhäuser, 2007 ; Heinze, 2008), ou encore orientées sur les composants (Dunkels et Vasseur, 2008 ; Cronin, 2010). Parmi cette multitude de définitions, celle de Kortuem *et al.* (2007) concilie différents aspects tout en conservant une forme de généralité :

Smart artifacts are objects of our everyday lives, **augmented** with information technology and equipped with sensing, computation, and communication capabilities, that are able to perceive and interact with their environment and with other smart objects. (Kortuem *et al.*, 2007)

Dans le cadre de nos travaux, nous pourrions préciser que ces objets sont tangibles. Pour différents auteurs, il y a également une dimension « service » associée aux produits intelligents (Porter et Heppelmann, 2014 ; Tomiyama *et al.*, 2019 ; Kawsar, 2009), cependant cette dernière n'est pas approfondie dans nos travaux. Les produits intelligents sont ainsi des objets de la vie courante ayant été « augmentés » par des composants électroniques, électriques, mais également du logiciel et de la connectivité. Cette notion d'augmentation est également discutée par (Kawsar, 2009), et utilisée par Thebault qui privilégie l'appellation de « produits augmentés » (Thebault, 2013). En complément, Kawsar considère que cette augmentation doit être comprise par l'utilisateur, mais également transparente. Les produits intelligents partagent donc des similarités avec leurs homologues traditionnels à travers la conservation de leur usage originel et parfois de leur apparence (Kawsar, 2009 ; Kortuem *et al.*, 2007).

Cette intelligence peut également posséder deux facettes. L'intelligence peut être centrée sur le produit, avec l'objectif de rendre ce dernier autonome dans ses actions, parfois sans aucune intervention humaine ; ou à l'inverse, être centrée sur l'utilisateur en le rendant plus « intelligent » à travers sa responsabilisation et sa prise de décisions, pouvant être exécutée par le produit par la suite (Streitz *et al.*, 2005 ; Kortuem *et al.*, 2007 ; Kawsar, 2009). Ces deux facettes sont représentées par Streitz *et al.* (2005) comme les deux extrémités d'un continuum sur lequel les produits se positionnent, pouvant alors utiliser une combinaison des deux. Toujours en lien avec le comportement et l'autonomie, Colombo, Djajadiningrat et Rampino

(2009) opposent le comportement « passif » des produits traditionnels, dans le sens où le produit est préprogrammé pour faire face à un certain nombre de situations et répondre aux actions de l'utilisateur, au comportement « actif » des produits intelligents, davantage dynamique. Le produit intelligent peut ainsi opérer indépendamment de la présence de l'utilisateur, répondre activement, s'adapter et prendre des décisions en lien avec l'utilisateur, son environnement ou en lien avec l'information provenant d'autres systèmes (Colombo, Djajadiningrat et Rampino, 2009). En complément, ces produits intelligents sont perçus comme attentifs à leur propre état, et disposent d'une capacité de collecte et de partage d'informations de l'environnement (Maass et Varshney, 2008 ; Kawsar, 2009 ; Mühlhäuser, 2007 ; Porter et Heppelmann, 2014). Du point de vue du développement de produits, cela amène à considérer l'usage du produit et son intégration dans son environnement évolutif.

D'une manière générale, les définitions des produits intelligents reposent essentiellement sur la conceptualisation de l'intelligence et ce qui est sous-entendu par ce terme. Cela nous renvoie à des travaux sur la sémantique, et l'articulation entre le terme, l'objet et le sens (Thomas et Fellmann, 2009). Dans ce cas précis des produits intelligents, l'objet est amené à évoluer, et le sens prêté au terme « intelligence » va évoluer conjointement. Ainsi, « intelligent » pourrait définir un ajout de fonctionnalités supplémentaires par rapport aux générations de produits précédentes. Les produits qualifiés « d'intelligents » à l'heure actuelle pourront être les produits traditionnels de demain. En 1999, Såde utilisait déjà cette dénomination pour définir des produits qui seraient désormais qualifiés de produits électroniques traditionnels. S'appuyant sur les travaux de Keinonen *et al.*, ces produits intelligents étaient des produits électroniques de consommation ou professionnels, interactifs avec leurs utilisateurs, intégrant logiciel et matériel. Il n'est alors pas encore question de connectivité, ni d'interaction avec d'autres systèmes et encore moins de prise de décision. C'est alors un produit essentiellement interactif offrant une interface utilisateur (UI) et davantage de fonctions (Såde, 1999). Vingt ans plus tard, l'intelligence se concrétise à travers « la reconnaissance (voix, visuelle, langage, etc.), le raisonnement, et l'apprentissage (ou l'amélioration) » (Tomiyaama *et al.*, 2019). Cette notion d'intelligence se définit ainsi à travers les capacités associées à ces

produits, elles-mêmes amenées à évoluer au cours du temps. Ainsi, l'interaction avec l'humain reste présente, mais l'intelligence actuelle est davantage axée sur l'autonomie et l'autogestion (Kortuem *et al.*, 2007).

La transition de produits traditionnels à intelligents passe actuellement par l'intégration de technologies permettant « l'intelligence », telles que des « capacités de détection, de traitement des données, de partage de l'information, de raisonnement et d'actionnement » (Dawid *et al.*, 2017), rendant de ce fait ces produits multidisciplinaires. La concrétisation de l'intelligence au sein des produits repose possiblement sur l'intégration des technologies d'intelligence artificielle (Tomiyama *et al.*, 2019). Ainsi, l'apprentissage machine basé sur les réseaux de neurones profonds – *Deep Neural Network* – a permis de compléter voire dépasser les résultats obtenus par les systèmes experts, permettant ainsi des gains en performance continus grâce à l'apprentissage (Tomiyama *et al.*, 2019). De notre point de vue, cette « intelligence actuelle » se réfère ainsi à une interaction avec ses utilisateurs, des capacités d'apprentissage et de contrôle avancées, de prise de décision, d'une capacité de s'adapter, réagir, se reconfigurer et se spécialiser à son environnement, traduisant une certaine autonomie, tendant vers le comportement « actif » décrit par Colombo *et al.* (2009).

Ces produits ont une matérialité et font donc aussi appel à de l'ingénierie mécanique, électrique et électronique. Leurs capacités « intelligentes » sont réalisées par du logiciel et leurs interactions avec des systèmes tiers sont assurées par de la connectivité. Ces produits reflètent ainsi la tendance actuelle de l'évolution des produits avec l'intégration de la connectivité et l'utilisation de technologies de l'information. En ce sens, Abramovici (2015) a proposé un archétype du produit intelligent à travers l'exemple d'un cellulaire intelligent. Un produit intelligent regrouperait ainsi des composants mécaniques, des composants matériels pour l'informatique, un logiciel embarqué, des capteurs et actionneurs, une unité de communication et des services basés sur l'Internet. En complément, Crepaldi *et al.* (2014), ajoutent la dimension énergétique avec un module « source d'énergie » et « conversion de l'énergie », et subdivise le traitement de l'information et le stockage des données. À cela, il semble manquer

la prise en compte des interactions avec l'utilisateur à travers des IHM, possiblement réalisées à travers des écrans et une interface développée en logiciel, ou encore des signaux audios ou haptiques (Dawid *et al.*, 2017), pouvant être réalisés, de manière non exhaustive, par des composants électroniques ou électromécaniques. La combinaison de ces différents travaux donne lieu à l'architecture générique représentée à travers la Figure 2.5.

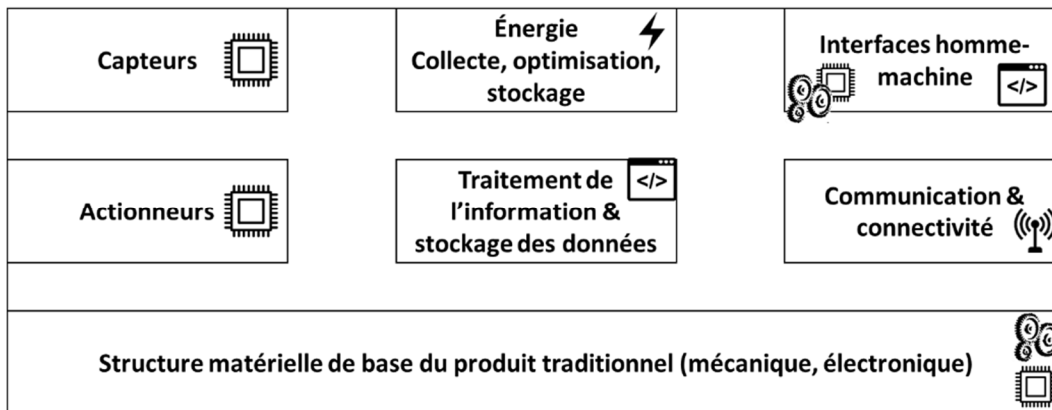


Figure 2.5 Architecture générique d'un produit intelligent

Tout comme le développement des SCP, le développement des produits intelligents invite également au changement des pratiques d'ingénierie. Le recours à une ingénierie multidisciplinaire contribue à l'amélioration des fonctionnalités du produit, mais induit en contrepartie une augmentation de la complexité (Tomiya *et al.*, 2019). Cette complexité est également le résultat de facteurs précédemment énoncés, que sont la miniaturisation, la demande du marché pour des produits plus performants et à coûts réduits (Crepaldi *et al.*, 2014). L'appréhension de la complexité de ces produits est un des enjeux de leur développement. Par conséquent, le mode actuel de développement des produits doit être fondamentalement adapté aux produits intelligents (Herzog et Bender, 2017). Cette recommandation est également partagée par Porter et Heppelmann (2014) qui ont souligné la nécessité de mettre en œuvre un nouvel ensemble de principes de conception, incluant une personnalisation basée sur le logiciel, la prise en considération de l'amélioration des produits par les mises à jour, ou encore les services qui leur sont associés. En ce sens, la

transition d'un produit traditionnel à un produit intelligent peut amener les entreprises à revoir leurs pratiques d'ingénierie.

2.3.3 Mécatronique

Le terme mécatronique est apparu au Japon dans les années 1960. À l'origine il était un nom propriétaire qui qualifiait des produits intégrant mécanique et électronique (Harashima, Tomizuka et Fukuda, 1996), produits qui seraient dès lors qualifiés d'électromécaniques. Selon Mohebbi, Achiche et Baron (2018), l'introduction des produits mécatroniques résulte d'une demande croissante pour des produits électromécaniques plus performants, flexibles et fiables dans la réalisation de tâches complexes. Ce gain en performance, flexibilité et fiabilité a été réalisé grâce à l'apparition et l'intégration de nouvelles disciplines. Ainsi, le concept initial de mécatronique a évolué à partir des années 1970 pour intégrer davantage de disciplines que sont l'informatique et le logiciel (Zheng, 2015). La mécatronique traduit la recherche d'une synergie entre la mécanique, l'électronique/électricité et l'informatique (Abramovici et Bellalouna, 2007 ; Freddi, 2009 ; Harashima, Tomizuka et Fukuda, 1996 ; Turki, Soriano et Sghaier, 2005 ; Hehenberger, 2014). Il est aussi parfois fait mention de l'automatique (AFNOR, 2008 ; Craig et Stolfi, 1994 ; Penas *et al.*, 2010 ; Warniez, Penas et Soriano, 2012 ; Tomiyama *et al.*, 2009). D'autres auteurs encore, tel que Pannaga, Ganesh et Gupta (2013), étendent la définition avec l'inclusion de l'hydraulique, du pneumatique et de l'optique.

Les produits mécatroniques ont également évolué à travers la proportion de fonctions réalisées par le logiciel, qui n'a cessé d'augmenter. L'intégration du logiciel a offert de nouvelles possibilités pour la réalisation des fonctions (Bricogne, Le Duigou et Eynard, 2016) et peut également conférer au produit des capacités de prise de décision ou d'apprentissage (Hehenberger, Howard et Torry-Smith, 2016). Combiné avec l'importance croissante du logiciel, la connectivité semble également se développer au sein de la mécatronique. Cela permet à la mécatronique d'améliorer de manière conséquente ses fonctionnalités (Dumitrescu *et al.*, 2012 ; Anacker *et al.*, 2013). Ainsi, sur la base de l'électromécanique, la mécatronique

s'est enrichie de disciplines complémentaires et perpétue son évolution à travers l'intégration de la connectivité et de capacités logicielles en faisant un produit multidisciplinaire toujours d'actualité. L'architecture générique correspondante est représentée par la Figure 2.6 qui regroupe alors des composants en lien avec le traitement des données et la prise de décision, des capteurs et actionneurs, une interaction possible avec des utilisateurs à travers une IHM, une communication possible avec d'autres systèmes, et enfin le système physique en lui-même, constitué de composants mécaniques, électriques, électroniques, etc. (Tomizuka, 2006). Cet agencement de composants est soutenu par un ensemble de disciplines d'ingénierie. Ce sont ces différentes disciplines combinées entre elles et les interactions qui peuvent en émerger qui font de la mécatronique un système complexe à développer (Hehenberger et Bradley, 2016).

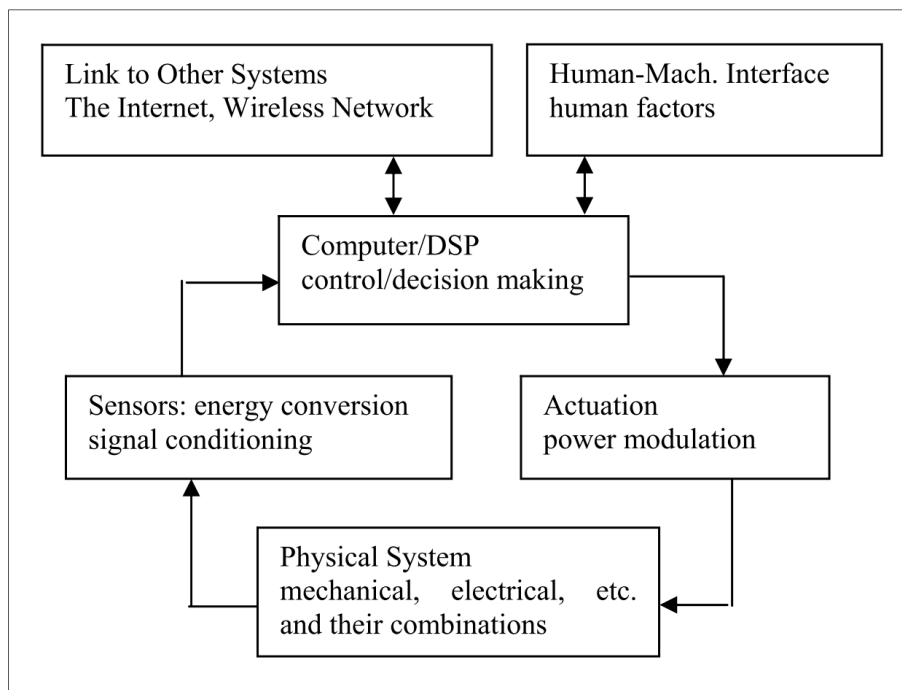


Figure 2.6 Architecture générique d'un système mécatronique moderne
Tirée de Tomizuka (2006)

L'intégration est un élément central du développement mécatronique et un des vecteurs de sa complexité (Abramovici et Bellalouna, 2007 ; Warniez, Penas et Soriano, 2012 ; Schuh,

Rudolf et Breunig, 2016), mais aussi une manière de l'appréhender en conjonction avec l'abstraction (Grimheden et Flening, 2019). Cette intégration peut être fonctionnelle, physique ou organisationnelle (Warniez, Penas et Soriano, 2012 ; Bricogne, 2015). L'intégration physique tend à augmenter la compacité d'un système, pouvant entraîner des couplages multiphysiques non désirés. L'intégration fonctionnelle cherche à accroître le nombre de fonctions au sein du produit, soit par l'attribution de plusieurs fonctions à un composant, soit à travers la dématérialisation. Enfin, afin d'obtenir un produit optimal, l'intégration conjointe des différentes disciplines est requise (Abramovici et Bellalouna, 2007). Ces intégrations relatives au produit et relatives à l'organisation sont liées, l'une affectant l'autre (Torry-Smith *et al.*, 2011). Cette intégration des disciplines est désignée intégration organisationnelle, mais peut aussi être rencontrée sous le terme d'intégration multidisciplinaire (Bricogne, 2015).

En ce sens, le développement de produits mécatroniques passe par une intégration des différentes disciplines en vue de converger vers une solution considérée comme optimale. Différents auteurs soulignent à cet effet que l'intégration tardive des contributions issues des silos disciplinaires engendre la création d'un système peu optimisé (Malmquist, Frede et Wikander, 2014 ; Abramovici et Bellalouna, 2007). Déjà en 1992, Salminen et Verho (1992) prônaient l'instauration d'une démarche collaborative dès les premières phases du développement. Les auteurs abordaient la nécessité d'une méta-méthode pour la mécatronique regroupant des concepts et techniques telles que des méthodes de conception, des modèles de processus de développement, des méthodes de coopération, ainsi qu'un langage commun (Salminen et Verho, 1992). La complexité du produit et de son développement est un enjeu pointé par différents chercheurs (Kaul, Meyer et Sextro, 2017 ; Chen *et al.*, 2019 ; Torry-Smith *et al.*, 2011 ; Abramovici et Bellalouna, 2007).

Cette augmentation de la complexité par rapport aux produits « traditionnels », engendre l'inadéquation des approches conventionnelles pour la conception et la gestion de projet comme le soulignent Bradley et Dawson (1991) et Malmquist, Frede et Wikander (2014). Allant dans le même sens, d'autres auteurs soulignent l'inadéquation des processus

(Abramovici et Bellalouna, 2007) et la nécessité d'implémenter de nouvelles méthodes et de nouveaux outils pour relever les défis du développement mécatronique (Torry-Smith *et al.*, 2011). La structure du développement de produits doit donc évoluer.

En synthèse, l'industrie doit s'adapter afin de développer de manière efficace ces nouveaux produits (Vasić et Lazarević, 2008). En effet, la manière de développer ces produits a peu évolué au cours des dernières années (Sadlauer et Hehenberger, 2017). Bien que la nécessité d'implémenter des processus spécifiques à la mécatronique ne soit pas nécessairement obligatoire, les processus doivent être adaptés aux contraintes de la multidisciplinarité (Sadlauer et Hehenberger, 2017).

D'autres terminologies relatives aux produits multidisciplinaires peuvent être rencontrées dans la littérature scientifique. Ces dernières sont présentées dans l'ANNEXE I.

Dans la section suivante, une synthèse relative aux trois catégories de produits multidisciplinaires considérés est présentée.

2.3.4 Vue globale et positionnement relatif des produits

Sur la base des définitions proposées dans les sections précédentes, il ne semble pas aisé au premier abord de déterminer clairement si un produit doit être qualifié de mécatronique, cyber-physique ou intelligent (Guerineau *et al.*, 2016). L'aspect communication et réseau paraît être une caractéristique singulière de la définition des SCP, mais qui peut être remise en cause par le développement de la mécatronique qui tend également à s'intéresser à cet aspect (Tomizuka, 2006), réduisant ainsi une potentielle divergence entre les deux définitions. De plus, la définition des produits intelligents proposée par Kortuem *et al.* (2007) sur laquelle nous nous basons exprime des caractéristiques proches des 3C à travers le traitement de l'information – *computation* – et la communication. L'aspect *sensing*, également cité par Kortuem *et al.* (2007), est également une caractéristique des SCP (Choi *et al.*, 2017).

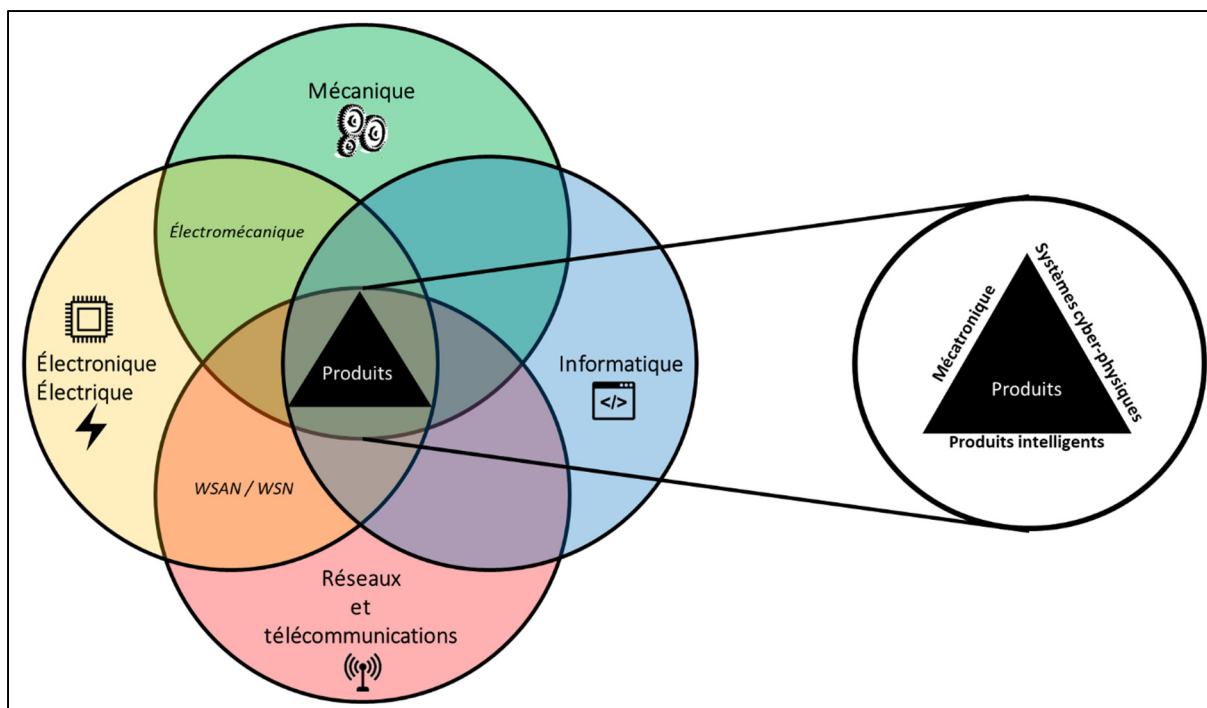


Figure 2.7 Vue de synthèse des différentes appellations de produits multidisciplinaires

Toujours en lien avec les définitions, il ressort également des précédentes sections que seule la mécatronique semble définie par les disciplines impliquées. À notre connaissance, seule Paetzold (2017) semble clairement les lister pour les SCP (Paetzold, 2017). Un constat similaire peut être dressé pour les produits intelligents qui sont, au même titre que les SCP, davantage définis par leurs capacités que par leurs disciplines. Ces trois types de produits semblent toutefois impliquer des disciplines similaires et se placent ainsi à la croisée de la mécanique, de l'électronique et électricité, de l'informatique, et des réseaux et télécommunications, possiblement dans des proportions différentes. La Figure 2.7 synthétise le positionnement de ces concepts. L'électromécatronique, les réseaux de capteurs et d'actionneurs (WSAN et WSN) sont positionnés au recouvrement des disciplines impliquées. Au centre, se trouvent les trois appellations qui sont la mécatronique, les SCP et les produits intelligents. Ces différents produits sont possiblement tous dotés de connectivité et ont la capacité de s'interconnecter et d'échanger des données. Ils peuvent ainsi être perçus comme des nœuds des réseaux de communications pouvant s'inscrire dans le paradigme de l'IdO

(Kortuem *et al.*, 2010 ; Tomiyama *et al.*, 2019 ; Niu, Anumba et Lu, 2019 ; Bradley *et al.*, 2015), et plus spécifiquement dans la vue « Objet ».

Cependant, bien que ces produits impliquent les mêmes disciplines et qu'il semble y avoir un consensus sur leurs définitions individuelles, l'éventuelle filiation ou hiérarchie entre eux reste sujette à discussion. Ainsi, certains auteurs entrevoient la mécatronique comme un sous-système ou des composants des SCP (Penas *et al.*, 2017 ; Merlo *et al.*, 2019), plaçant de ce fait les SCP comme les systèmes intégrateurs de la mécatronique, inférant ainsi une hiérarchie entre les SCP et la mécatronique. Suivant cette hiérarchie, certains auteurs perçoivent les SCP comme intégrateur de systèmes mécatroniques interconnectés par l'IdO (Graessler et Hentze, 2020). D'une manière plus nuancée, Plateaux *et al.* (2016), comparent les « systèmes mécatroniques » et les SCP. Les « systèmes mécatroniques » peuvent ainsi être considérés comme faisant partie des SCP. Cependant, les auteurs soulignent que la frontière entre les systèmes mécatroniques et cyber-physiques n'est pas encore consensuelle au sein de la communauté scientifique. Dans une vision plus large, positionnant les produits intelligents, Abramovici (2015) étend cette notion de hiérarchie et d'évolutivité entre les différents concepts. Au plus bas niveau se trouvent les produits mécatroniques. Ces produits mécatroniques, dotés d'intelligence évoluent vers des produits mécatroniques intelligents, rajoutant de ce fait un concept intermédiaire avec les SCP. S'appuyant sur ces produits mécatroniques intelligents, les SCP intègrent de surcroît une dimension « communication ». Cette différenciation basée sur la communication tend, de notre perspective, à s'estomper comme mentionné plus haut. Enfin, l'intégration des services basés sur l'Internet et la connectivité avec l'Internet des données, des humains, des services et des objets a permis le développement des produits intelligents (Abramovici, 2015). Cette vision hiérarchique, plaçant les produits intelligents au sommet semble également partagée par (Tomiyama *et al.*, 2019 ; Herzog et Bender, 2017). La vision inverse existe également, où les produits intelligents sont les sous-composants des SCP (Roblek, Meško et Krapež, 2016 ; Niu, Anumba et Lu, 2019). Enfin, dans une vision moins hiérarchique, certains auteurs envisagent les SCP comme une

évolution de la mécatronique (Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.*, 2016). Il n'existe alors aucun consensus quant à leur agencement hiérarchique.

Se détachant de cette hiérarchie, d'autres auteurs considèrent les SCP et la mécatronique comme étant deux approches des systèmes émergeant de communautés différentes (Hehenberger, Bricogne, *et al.*, 2016 ; Bricogne, 2015). La mécatronique et les SCP intègrent tous deux des éléments matériels – *hardware* – et des éléments logiciels, informatiques – *software*. La différenciation tiendrait plutôt au fait que la mécatronique semble ancrée dans une communauté issue du matériel contrairement aux SCP qui se basent sur un héritage logiciel. Cette absence de recherche d'une hiérarchie est également partagée par (Ulsoy, 2019) qui semble considérer la mécatronique et les produits intelligents au même niveau. C'est également la vision que nous adopterons.

Ces trois types de produits, SCP, mécatronique et produits intelligents, sont des appellations distinctes. Ils intègrent cependant les mêmes disciplines, des composants similaires agencés au sein d'architectures génériques comparables (voir les Figure 2.3, Figure 2.5, et Figure 2.6). Les différences ne se jouent donc pas sur leurs définitions, ni dans leurs architectures, leur agencement, ou leur intégration dans un paradigme (IdO), mais résideraient davantage dans certaines capacités ou propriétés de ces produits.

Selon notre compréhension, les SCP se distinguent de par leur flexibilité, leur résilience et leur capacité de reconfiguration qui sont permises grâce à une architecture basée sur les systèmes agents. Cela leur confère une capacité de décentralisation pour les prises de décision (Plateaux *et al.*, 2016). À cela s'ajouterait une considération importante pour la cybersécurité (Kim et Kumar, 2012). Enfin, les SCP s'opposeraient, entre autres, à la mécatronique, de par le fait qu'ils sont plus étendus dans l'espace/géographiquement (Plateaux *et al.*, 2016 ; Kim et Kumar, 2012).

Nous percevons la mécatronique comme un produit axé sur la synergie des disciplines et l'excellence du matériel et du contrôle. Ce sont des produits permettant d'atteindre des performances élevées dans un souci de compacité et donc d'intégration spatiale, résultant en des produits plus contenus spatialement que les SCP (Plateaux *et al.*, 2016).

Les produits intelligents sont quant à eux perçus comme étant des produits de grande consommation tournés vers les utilisateurs, intégrant possiblement des services (Dawid *et al.*, 2017). L'interaction entre l'utilisateur et le produit est au cœur de ces produits. Leur « intelligence » semble émerger de cette interaction et de la collecte de données associée permettant un apprentissage de l'environnement et des comportements des utilisateurs. Cela permet alors une prise de décision et une certaine capacité d'autonomie.

Ces différentes caractéristiques, propres à chacun de ces types de produits, peuvent appeler à différents processus, méthodes et outils au cours de leur développement. De plus, les différentes communautés qui les ont étudiés influent sur la manière de développer ces produits. Ainsi, ces derniers peuvent être issus d'un héritage qui pourrait teinter la structure de développement utilisée. Cela suggère qu'il n'y aurait pas une manière unique de développer les produits multidisciplinaires, ce qui renforce l'intérêt pour nos travaux.

Au-delà du débat sur leur agencement hiérarchique, nous nous intéressons davantage à identifier des concepts et techniques et à structurer le développement de ces trois types de produits. Aussi, nous regroupons l'ensemble de ces trois types de produits sous l'appellation commune de « produits multidisciplinaires ».

La section suite présente notre positionnement en vue d'introduire les objectifs de recherche par la suite.

2.4 Positionnement de nos travaux

La section précédente a permis de caractériser trois types de produits multidisciplinaires que sont les produits mécatroniques, les SCP et les produits intelligents. Bien que chacun de ces produits ait leurs propres caractéristiques et enjeux inhérents à leur développement, il apparaît certains dénominateurs communs. En effet, dans une dynamique d'évolution des produits traditionnels vers des produits multidisciplinaires, leur développement repose sur l'intégration de nouvelles technologies et disciplines. Il en résulte un processus de développement plus complexe (Tomiyama *et al.*, 2007 ; Tomiyama *et al.*, 2019 ; Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012), un besoin d'une vue commune, d'une meilleure collaboration, d'un fonctionnement plus intégré et donc moins siloté (Bricogne, 2015 ; Den Hollander, 2015). Cette augmentation conjointe de la complexité produit et organisationnelle doit être appréhendée. Par ailleurs, comme nous avons pu le voir dans la section précédente, de multiples auteurs soulignent l'inadéquation des concepts et techniques employés pour le développement de produits multidisciplinaires, et ce pour chaque type de produit (Paetzold, 2017 ; Wang, 2018 ; Dumitrache *et al.*, 2017 ; Broy et Schmidt, 2014 ; Darwish et Hassanien, 2018 ; Song *et al.*, 2019 ; Hehenberger, Howard et Torry-Smith, 2016 ; Tomiyama *et al.*, 2019 ; Herzog et Bender, 2017 ; Porter et Heppelmann, 2014 ; Bradley et Dawson, 1991 ; Malmquist, Frede et Wikander, 2014 ; Abramovici et Bellalouna, 2007 ; Torry-Smith *et al.*, 2011 ; Salminen et Verho, 1992 ; Sadlauer et Hehenberger, 2017). En ce sens, il y a une nécessité d'accompagner l'évolution des produits par une évolution des pratiques de développement au sein des entreprises (Mhenni *et al.*, 2014 ; Malmquist, Frede et Wikander, 2014). Cette nécessité est appuyée par Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone (2012) qui soulignent qu'un nombre croissant d'entreprises va être confronté à de véritables difficultés concernant le développement des prochaines générations de produits. Comme nous avons également pu le voir, nous envisageons un accompagnement de ces dernières à travers l'adoption de nouvelles structures de concepts et techniques pour le développement.

En ce sens, cette augmentation de la complexité des produits, l'inadéquation des pratiques employées, la nécessité de considérer l'ensemble de la structuration du développement, nous poussent à considérer le besoin d'une vue plus macroscopique du développement de produits. Cette vue globale traduit une nécessaire prise de recul. En effet, plusieurs travaux viennent proposer des processus, méthodes ou outils, mais peu tentent d'explicitement une structure à implémenter et des passerelles d'évolution entre la structure utilisée et celle à implémenter. De plus, ce constat du manque de travaux traitant du développement à travers une vue d'ensemble a été formulé par Tomiyama *et al.* dans un récent article, « only few research projects and activities address the development of smart products topics comprehensively » (Tomiyama *et al.*, 2019).

Cette nécessité d'une vue globale s'est confirmée au début de nos recherches. En approchant les articles qui décrivent les manières de développer un produit multidisciplinaire, nous avons fait face à une multitude de concepts et de techniques, et la question de leur choix nous apparaissait comme problématique, notamment du fait que des articles peuvent orienter vers des concepts et techniques différents. De même, la manière dont les concepts et techniques peuvent être structurés et utilisés conjointement demeure peu étudiée.

En résumé, nos travaux se basent donc sur une nécessité d'une vue globale du développement de produits multidisciplinaires, et sur la structuration du développement en vue d'accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs produits. Afin de guider les entreprises, il y a un besoin d'organiser la variété de connaissances et la pluralité importante de concepts et techniques existants, mais aussi de documenter la manière dont les entreprises travaillent actuellement. Ces différents aspects que sont l'accompagnement des entreprises, l'organisation des connaissances relatives aux concepts et techniques, la documentation de la manière dont les entreprises travaillent actuellement préfigurent nos objectifs de recherche. Ces derniers sont présentés et formalisés dans les encadrés de la section suivante, puis synthétisés graphiquement afin d'illustrer leurs articulations.

2.5 Objectifs de recherche

L'objectif principal de nos travaux est de proposer une démarche permettant aux entreprises d'identifier et de structurer un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires. La finalité recherchée est ainsi de permettre aux entreprises d'appréhender l'augmentation de complexité induite sur le produit et sur le développement de produits, offrant alors un élément de réponse à notre problématique. Par le biais de nos travaux, nous cherchons à guider les entreprises à travers la variété de concepts et techniques existants, ainsi qu'à faciliter le transfert de connaissances entre la littérature scientifique et la pratique.

Objectif principal

Proposer une démarche permettant aux entreprises d'identifier et de structurer un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires.

La réalisation de l'objectif principal passe, d'une part, par la structuration des connaissances scientifiques relatives au développement de produits multidisciplinaires et, d'autre part, par la compréhension de la manière dont les entreprises travaillent en pratique. Cela fait écho au volet pratiques industrielles et au volet littérature scientifique mentionnés lors de la formulation de la problématique. La comparaison permet par la suite de caractériser les écarts et les similarités qui subsistent entre ces deux volets.

Notre premier objectif spécifique, en lien avec le volet littérature scientifique, cherche ainsi à organiser le paysage fragmenté du développement de produits multidisciplinaires. Cela va donc bien au-delà d'une « simple » revue de littérature. Comme nous avons pu l'évoquer lors de la section précédente, la littérature sur le développement de produits multidisciplinaires est riche, mais doit être organisée pour être appréhendée. Notre premier objectif spécifique cherche donc à cartographier les concepts et techniques proposés par la littérature scientifique

afin d'y identifier des ensembles cohérents pour structurer le développement des produits multidisciplinaires que sont la mécanique, les produits intelligents et les SCP.

Objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique

Cartographier les concepts et techniques proposés par la littérature scientifique afin d'y identifier des ensembles cohérents pour structurer le développement des produits multidisciplinaires que sont la mécanique, les produits intelligents et les SCP.

Notre second objectif spécifique, en lien avec le volet pratiques industrielles, vise à identifier puis cartographier les concepts et techniques employés par les entreprises pour organiser le développement de leurs produits multidisciplinaires, ainsi que les critères ayant piloté les possibles évolutions (adaptation ou sélection) de leurs pratiques de développement de produits. Ce deuxième objectif spécifique comprend donc deux volets. Le premier vise à comprendre comment les entreprises développent actuellement leurs produits multidisciplinaires. Le second porte sur l'analyse des modalités de sélection et d'adaptation employées par les entreprises ayant déjà fait évoluer leurs pratiques.

Objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles

Identifier puis cartographier les concepts et techniques employés par les entreprises pour organiser le développement de leurs produits multidisciplinaires, ainsi que les critères ayant piloté les possibles évolutions (adaptation ou sélection) de leurs pratiques de développement de produits.

Enfin, l'atteinte de ces deux objectifs spécifiques permettra la réalisation du troisième objectif spécifique tourné vers l'identification des écarts et des similarités entre les propositions de la littérature scientifique et les pratiques industrielles liées au développement de produits multidisciplinaires. La formalisation des écarts et similarités contribuera à distinguer les opportunités d'amélioration pour les entreprises.

Objectif spécifique de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles

Identifier les écarts et les similarités entre les propositions de la littérature scientifique et les pratiques industrielles liées au développement de produits multidisciplinaires en vue de distinguer les opportunités d'amélioration pour les entreprises.

Ces trois objectifs spécifiques s'articulent donc afin d'apporter une réponse à l'objectif principal. Les objectifs spécifiques « cartographie de la littérature scientifique » et « analyse des pratiques industrielles » sont indépendants, mais leur atteinte est nécessaire afin de réaliser l'objectif spécifique comparatif, en vue de répondre à l'objectif principal. L'agencement de ces objectifs est présenté par la Figure 2.8.

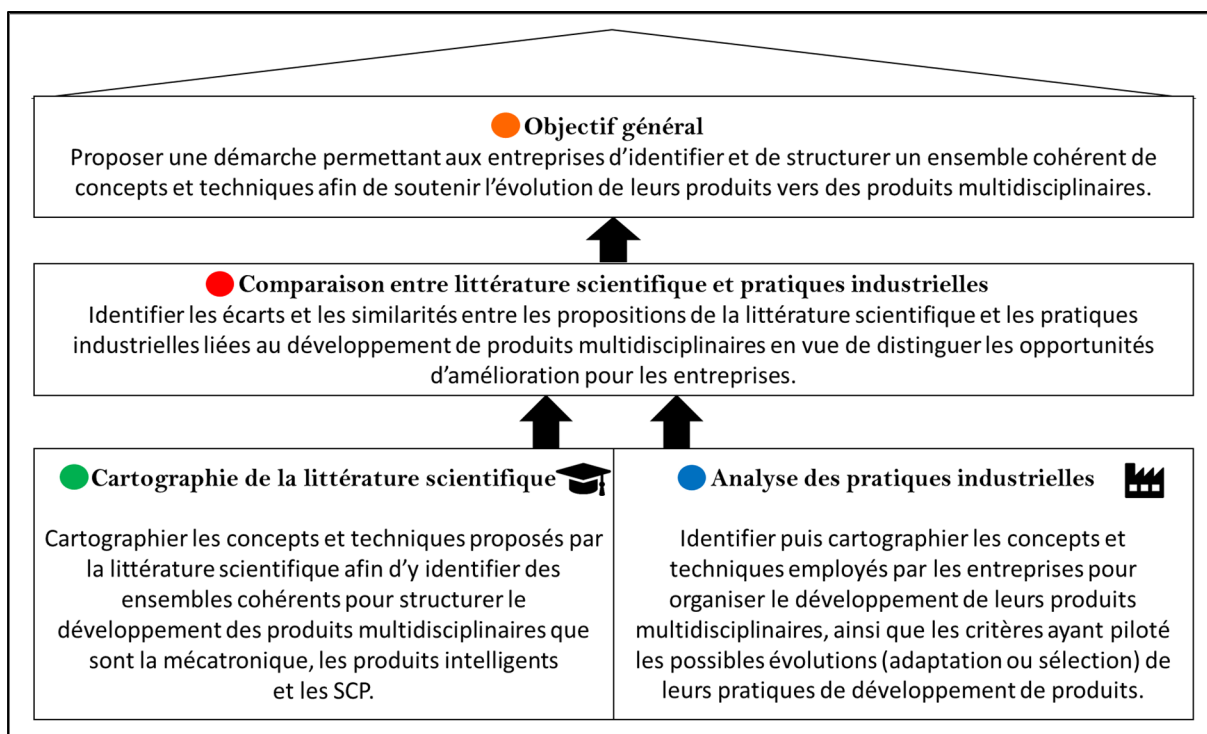


Figure 2.8 Agencement des objectifs spécifiques de recherche vers la réalisation de l'objectif général

2.6 Méthodologie de recherche

Comme nous avons pu le voir à la section précédente, notre objectif principal de recherche s'oriente vers l'élaboration d'une démarche d'accompagnement des entreprises pouvant être considérée comme étant un artéfact. Par ailleurs, notre objectif principal peut être perçu comme un problème de design. Notre démarche de recherche s'inscrit dans ce qui est qualifié de *Design Science* (Johannesson et Perjons, 2014 ; Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015 ; Wieringa, 2009 ; Hevner *et al.*, 2004). Au sein de ce paradigme, différents auteurs proposent des méthodologies de recherche. On pourra citer le « regulative cycle » proposé par Wieringa (2009), le *framework de design science research* (DSR) (Johannesson et Perjons, 2014), ou encore celui de Dresch, Lacerda et Antunes Jr. (2015). Ces différentes méthodologies ont en commun un cheminement similaire avec une étape de définition du problème (1), suivie de la proposition d'une solution sous la forme d'un artéfact (2) et enfin de l'évaluation de la solution (3). Notre méthodologie de recherche est organisée autour de ces trois grandes étapes et est présentée par la Figure 2.9.

La Figure 2.9 présente également les chapitres associés aux étapes de notre méthodologie. On y retrouve les éléments présentés dans nos deux premiers chapitres, à savoir le contexte, la problématique et les objectifs de nos travaux. Cela correspond à l'étape de définition du problème (1). Le chapitre 3 fait état des connaissances actuelles qui apportent une réponse partielle à nos objectifs, justifiant le besoin de créer de nouvelles connaissances. Cet état de l'art est conduit en relation avec notre objectif principal, ainsi que nos trois objectifs spécifiques. Les chapitres 4 à 8 décomposent les différentes étapes permettant d'élaborer la démarche d'accompagnement proposée (2). Le chapitre 4 présente ainsi un modèle en quatre niveaux permettant d'organiser et comparer des structures de concepts et techniques. Ce modèle sert de base à la cartographie de la littérature scientifique et à l'analyse des pratiques industrielles, détaillées respectivement au chapitre 5 et au chapitre 6. Ces deux études font intervenir des collectes de données. Dans DSR (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015), ou encore dans les travaux de Johannesson et Perjons (2014), différentes techniques de collecte

de données sont suggérées. Pour notre volet littérature scientifique, la bibliographie a été retenue. Pour notre volet pratiques industrielles, l'entrevue semi-directive a été préférée et combinée à une analyse qualitative. La méthodologie de ces deux collectes de données est précisée au début de leurs chapitres respectifs. Le chapitre 7 s'attarde sur la comparaison entre la littérature scientifique et les pratiques industrielles en vue d'identifier les manques au sein des entreprises, avant de présenter le cœur de notre proposition dans la première partie du chapitre 8 à travers l'élaboration d'une démarche d'accompagnement venant conclure la deuxième étape (2). La seconde partie du chapitre 8 aborde la validation de nos travaux. Ainsi, afin d'évaluer si la démarche d'accompagnement proposée répond à notre objectif principal, trois critères ont été établis. Premièrement, la démarche et ses constituantes doivent permettre de naviguer dans le corpus scientifique. Deuxièmement, la démarche et ses constituantes doivent guider les entreprises dans la sélection des concepts et techniques appropriés à leur développement de produits. Troisièmement, la démarche doit être considérée comme utile pour les industriels. Par la suite, le chapitre 9 présente une application de nos travaux sur un cas industriel réel. Ces éléments relèvent de la troisième étape (3). Ce cheminement méthodologique, représenté par la Figure 2.9, se conclut par le chapitre 10 présentant une discussion sur nos travaux, ainsi que ses perspectives.

Enfin, sur la gauche de la Figure 2.9, nous avons fait mention d'une partie de nos travaux qui nous a permis d'acquérir des connaissances sur la variété des concepts et techniques disponibles pour accompagner un développement de produit. Elle a été l'occasion d'énumérer et d'explorer près de 300 concepts et techniques existants, mais elle ne sera pas présentée dans ce manuscrit.

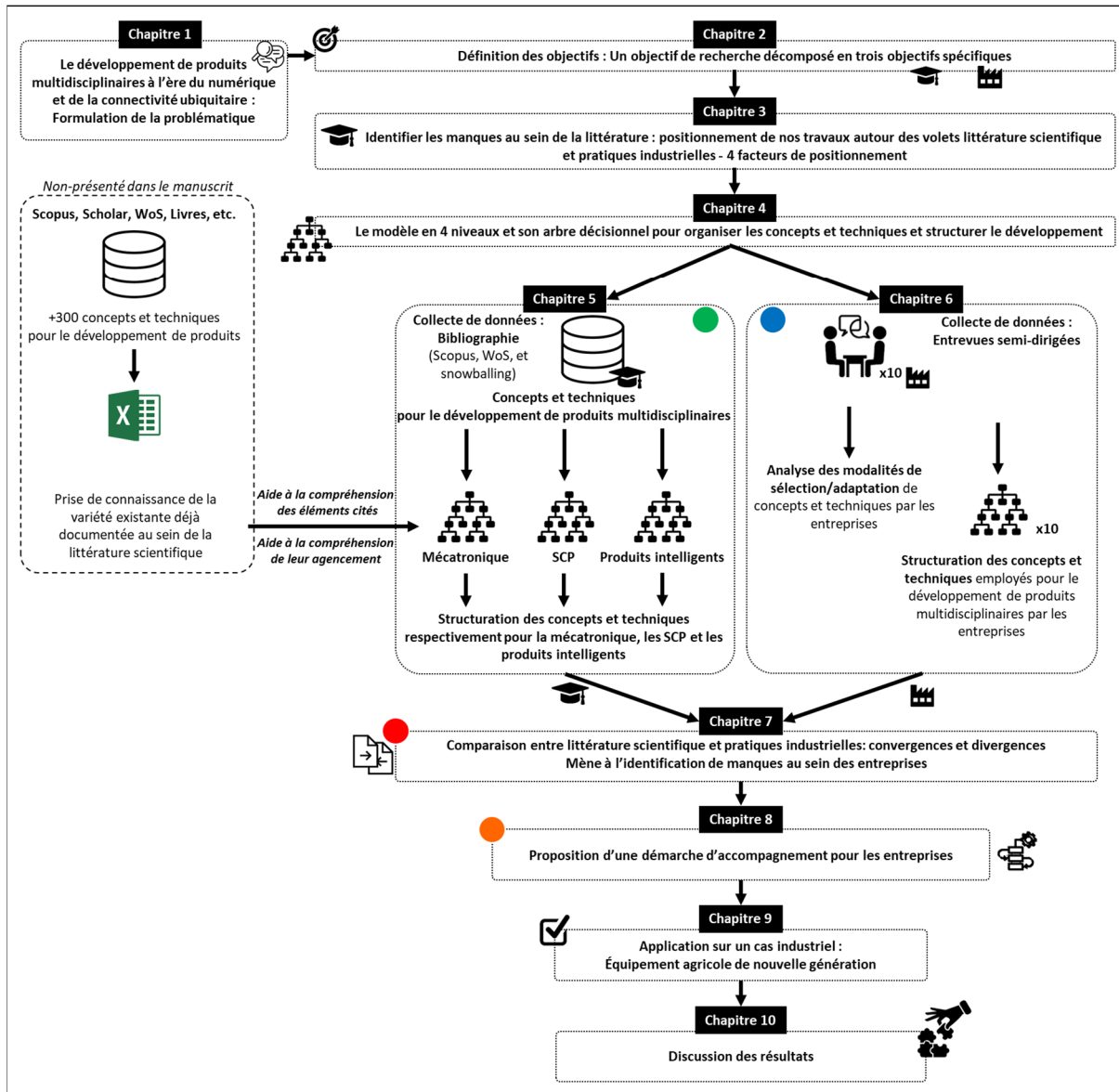


Figure 2.9 Méthodologie générale adoptée pour nos travaux

2.7 Synthèse du contexte

Le chapitre 1 a permis de présenter le contexte général axé sur la 4^{ème} révolution industrielle et plus largement l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire induisant une évolution des produits traditionnels vers des produits multidisciplinaires. Parallèlement, cette évolution implique des modifications sur les pratiques de développement et leurs structurations, en

termes de processus, de méthodes ou d'outils. Pour préciser ce contexte, le chapitre 2 a permis d'apporter des précisions sur les apports et les défis portés par la connectivité, de détailler trois types de produits multidisciplinaires que sont la mécatronique, les SCP, les produits intelligents qui se positionnent comme la vue « Objet » de l'IdO. La figure de synthèse du chapitre 1 a été enrichie en conséquence pour former la Figure 2.10.

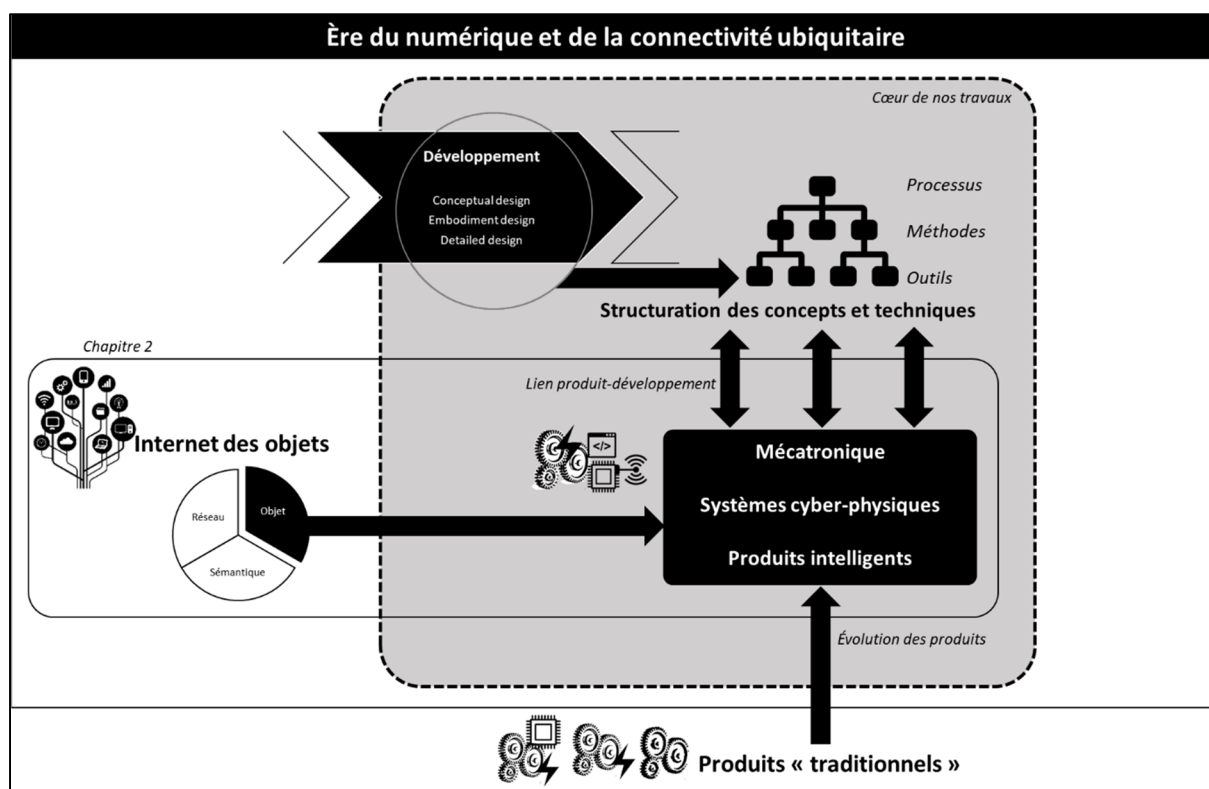


Figure 2.10 Synthèse thématique du chapitre 2 : produits multidisciplinaires et Internet des Objets

Ces produits multidisciplinaires et leur développement sont plus complexes que leurs prédécesseurs, ce qui invite les entreprises à modifier leurs pratiques de développement. En ce sens, notre objectif principal traduit cette volonté d'accompagner les entreprises dans l'évolution conjointe de leurs produits et de leurs pratiques de développement. Cet objectif principal a été subdivisé en trois objectifs spécifiques. L'accompagnement des entreprises passe de notre point de vue par la cartographie de la littérature scientifique, l'analyse des

pratiques industrielles, et l'identification des similarités et des écarts en vue de converger vers notre proposition. Le chapitre suivant présente l'état de l'art portant sur les travaux existants en lien avec notre objectif général et nos objectifs spécifiques, afin de positionner nos travaux par rapport aux connaissances existantes.

CHAPITRE 3

ÉTAT DE L'ART : LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES

Les chapitres précédents ont présenté une mise en contexte de nos travaux, permettant d'introduire la problématique, les objectifs puis la méthodologie. Le chapitre 3 vise à mettre en lumière les travaux issus de la littérature permettant d'apporter des éléments de réponse aux objectifs et à positionner l'apport de nos travaux. Afin d'affiner notre positionnement, quatre facteurs traduisant nos objectifs sont présentés dans la section 3.1. La section 3.2 s'attarde quant à elle à présenter différents travaux cherchant à accompagner les entreprises dans le changement de leurs pratiques de développement, ce qui vise à répondre à notre **objectif principal**. La section 3.3 expose les travaux ayant trait à organiser des concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires, éléments qui permettront de répondre partiellement à notre **objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique**. La section 3.4 porte sur les études descriptives documentant les pratiques de développement employées par les industriels, ainsi que la sélection de nouvelles pratiques. Cette section cible donc l'**objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**. La section 3.5 aborde notre **objectif spécifique de comparaison** et souligne les réponses actuelles à ce dernier. Cette section évoque notamment des éléments de réponses qui émergent des travaux évoqués au cours des autres sections. Enfin, la section 3.6 établit une synthèse et positionne nos travaux relativement aux connaissances existantes.

3.1 Organiser l'état de l'art : facteurs de positionnement

Afin d'analyser la littérature sous l'angle des objectifs précédemment présentés et d'affirmer l'originalité de nos travaux, différents facteurs d'analyse de la littérature, et donc de positionnement de nos travaux, sont proposés. Le premier permet de focaliser notre analyse sur la multidisciplinarité alors que le second s'attarde sur la structuration hiérarchique des

concepts et techniques. Le troisième facteur traite de l'étendue des concepts et techniques couverts, et est dénommé niveau de couverture. Enfin, le quatrième facteur relève les éléments permettant aux entreprises de naviguer et choisir de nouveaux concepts et techniques ou structures. Les sections suivantes détaillent chacun de ces facteurs de positionnement, regroupés en colonnes dans la Figure 3.1.

3.1.1 1^{er} facteur de positionnement : la multidisciplinarité

Le premier facteur de positionnement porte sur la prise en compte de la multidisciplinarité au sein des travaux. En effet, cet aspect est central dans nos recherches, nous permettant de nous positionner sur les problématiques actuelles du développement de produits. Différents travaux antérieurs abordent le développement logiciel, mécanique, électronique ou de système de contrôle, mais c'est bien la combinaison et l'intégration de ces développements qui nous intéresse. Le caractère multidisciplinaire de l'étude peut être mentionné à travers le type de produit ciblé, *i.e.* mécatronique, SCP, ou produit intelligent, mais également par une énumération des disciplines impliquées.

Dans l'analyse, la valeur prise par ce facteur est « multidisciplinaire » et dans le cas où le type de produit multidisciplinaire est mentionné, il sera précisé. La valeur prise par ce facteur sera de « non spécifié » dans le cas où les auteurs n'explicitent pas le caractère multidisciplinaire.

3.1.2 2^{ème} facteur de positionnement : la structuration des concepts et techniques

Le deuxième facteur ayant une importance capitale dans la réalisation de nos objectifs est la notion de structuration des concepts et techniques. Cela traduit un effort du ou des auteurs afin d'organiser et d'agencer hiérarchiquement des concepts et techniques de telle sorte que le processus soit appuyé par les méthodes, elles-mêmes soutenues par les outils. Cette hiérarchie de concepts et techniques permet de soutenir le développement de produits à différents niveaux. Cette structuration peut par la suite être instanciée partiellement ou complètement au

sein des entreprises. Ces structurations peuvent prendre la forme d'une proposition positionnée au sein d'un processus existant, ou encore de « boîte à outils » et de *framework* au sein de la littérature, mais également être évoquées textuellement, ou encore à travers une représentation graphique. Enfin, certains chercheurs formalisent une structuration au sein d'un même niveau, par exemple en associant des méthodes, ce qui sera pris en considération. Nous distinguons trois types de valeur pour ce critère : « structuré », « partiellement structuré », et « non structuré ». Structuré est utilisé dans le cas où l'ensemble des niveaux mentionnés sont inter reliés ; partiellement structuré, est utilisé dans le cas où certains niveaux sont agencés entre eux, mais pas l'intégralité des niveaux mentionnés, ou que la structuration est formalisée au sein d'un niveau, mais pas entre les différents niveaux ; enfin non structuré est utilisé dans le cas où les chercheurs ne formalisent pas de structuration.

3.1.3 3^{ème} facteur de positionnement : la couverture des concepts et techniques

Un autre facteur à prendre en considération dans le cadre de nos travaux est l'étendue de la couverture des concepts et techniques. Cette étendue peut être considérée « verticalement » et « horizontalement ». Pour la « couverture verticale », le facteur analyse le nombre de niveaux considérés parmi les niveaux « processus », « méthode », et « outil » mentionnés au chapitre 1. Comme nous le verrons par la suite, les articles mentionnent une variété importante de termes, que nous avons rapprochés de ces trois niveaux de référence. Ces trois niveaux de références sont basés sur nos définitions et le rapprochement est appuyé par un arbre de décision. Ces deux éléments sont introduits au chapitre 4. Pour la « couverture horizontale », le facteur analyse la variété de processus, de méthodes et d'outils rassemblée par les travaux considérés. Là où certains travaux ne vont s'attarder que sur une couverture de quelques concepts et techniques, d'autres à l'inverse vont tenter d'en associer une multitude. Cette multitude est analysée en regard de chacun des niveaux développés par l'étude.

Le facteur compte donc deux composantes, avec verticalement les niveaux pris en considération et horizontalement la variété par niveau. Dans le cas où le nombre de concepts

et techniques inclus dans les travaux est indiqué, ce dernier est rapporté. La valeur prise par ce facteur correspond donc à la dénomination des niveaux employés, ainsi que la couverture sur chacun des niveaux.

3.1.4 4^{ème} facteur de positionnement : la navigation

Nos travaux cherchent à accompagner les entreprises dans l'adoption de nouvelles pratiques de développement. Dans cette logique, le quatrième facteur s'attache à relever des éléments permettant de guider la navigation à travers les concepts et techniques disponibles. Ces éléments peuvent être des caractérisations et des comparaisons de concepts et techniques, des aides à l'implémentation (sélection et adaptation) permettant de guider les entreprises dans la modification de leurs pratiques. Ces aides peuvent prendre des formes variées telles que des listes de critères, des lignes directrices, des feuilles de route, voire des logiciels. La navigation intervient généralement dans le cas d'un choix à effectuer entre différents concepts et techniques ou structures possibles. La valeur prise par ce facteur est une nouvelle fois booléenne – oui, un accompagnement est proposé vs. non, aucun guide n'est explicité. En complément, cette valeur est précisée par la nature de l'aide, et dans le cas de critères pour une comparaison ou caractérisation, ces derniers sont précisés. Ils peuvent alors être quantitatifs ou qualitatifs, et leur nombre est souligné lorsque cela est possible. Ces critères peuvent porter, de manière non exhaustive, sur la nature intrinsèque du produit, l'environnement de développement, ou encore l'environnement/contexte de l'entreprise.

3.1.5 La représentation des quatre facteurs

L'ensemble de ces quatre facteurs compose notre grille d'analyse de la littérature scientifique, rappelée à la fin de chaque section sous forme de tableaux, permettant d'offrir une vue de synthèse mettant en lumière les manques dans la littérature scientifique et permettant d'établir notre positionnement face aux connaissances répertoriées. Nos différents tableaux de synthèse sont codifiés. Cette codification est consignée et exemplifiée par la Figure 3.1.








Couleur de l'entête : lien avec les objectifs								
<div><div>● Objectif principal</div><div>● Objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles</div><div>● Objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique</div></div>								
Type de produit multidisciplinaire renseigné								
Références	Multidisciplinarité	Structuration	Couverture verticale		Couverture horizontale <i>interprétée</i>			
			Couverture		Navigation	Commentaires		
Référence A	 Mécatronique		Terme référence A	Processus	(Faible)	Oui, critères A	Exemple	
Référence B	Non spécifiée		Terme référence A	Méthodes		(Faible)	Non	Exemple
			Terme référence A	Outils				
Référence B					Terme référence B	Processus		
Référence C	 SCP		Terme référence B	Méthodes	(Importante)	Oui, critères A	Exemple	
			Terme référence B	Outils				
Référence C					Terme référence C (NP)	Processus		Oui, critères A
Référence D	 Intelligents		Terme référence C (NP)	Méthodes		Oui, critères A	Exemple	
			Terme référence C (NP)	Outils				
<div>Structuration : structurée (A), partiellement structurée (B), non structuré (C&D)</div> <div>Couverture horizontale renseignée par la référence (NP : Non-précisée)</div> <div>Termes employés dans la référence (A, B, C ou D)</div> <div>Termes employés dans nos travaux</div>								

Figure 3.1 Codification des tableaux de synthèse

Le premier élément de codification porte sur la couleur de l'entête des tableaux qui renseigne sur l'objectif auquel les travaux répertoriés cherchent à apporter un élément de réponse. Le code couleur est similaire à celui utilisé sur les figures du chapitre précédent, et sera repris au long du manuscrit. En termes de lecture des tableaux, l'exemple ci-dessous indique que la référence A traite du développement multidisciplinaire par la présence du pictogramme, et plus précisément du développement mécatronique, indiqué textuellement. Pour les références C et D, il s'agit respectivement du développement des SCP et des produits intelligents. La référence A démontre une structuration sur l'intégralité des trois niveaux abordés, identifiés dans la colonne couverture par les trois flèches en noir. À la gauche des flèches sont rappelés les termes employés par la référence A ; à la droite des flèches, en italique, l'équivalence avec nos niveaux processus, méthode et outil. La couverture horizontale est indiquée entre parenthèses, à gauche des flèches, lorsqu'elle est reprise de la référence A ; à droite, en italique lorsqu'elle relève de notre compréhension. Ici, pour la référence A, la couverture horizontale relève de notre compréhension et est jugée « faible » sur chacun des trois niveaux. Enfin, les

éléments relevés pour la navigation sont contenus dans la colonne du même nom, ici sur la base de critères.

À noter que la couverture horizontale, est dans la majorité des tableaux, évaluée et représentée qualitativement, sur trois niveaux que sont « faible », « modérée », ou « importante ». La couverture sera considérée comme « faible » pour 1 à 2 processus, 1 à 5 méthodes et 1 à 8 outils ; elle sera considérée comme « modérée » pour 3 à 5 processus, 6 à 15 méthodes, et 9 à 20 outils ; et elle sera considérée comme « importante » à partir de 6 processus, 16 méthodes ou 21 outils. Enfin, dans certains cas, « non-précisé » indique qu'il n'est pas possible d'évaluer la couverture.

3.2 Accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques

La section précédente a fait état de nos critères de positionnement dérivés de nos objectifs. Cette section passe en revue les travaux existants dont la finalité est d'accompagner l'évolution des pratiques de développement de produits au sein des entreprises, donc venant apporter une réponse à notre **objectif principal**. Cette section aborde donc dans un premier temps les travaux qui cherchent à accompagner la transformation des entreprises d'une manière macroscopique, notamment à travers la transformation numérique. Dans un second temps, l'accent est mis sur les travaux traitant exclusivement du développement de produits et de l'accompagnement des entreprises vers de nouvelles pratiques. Cela inclut les travaux proposant une nouvelle structure de développement, des feuilles de route, traitant de l'ingénierie des processus, mais aussi des travaux en lien avec la caractérisation, ou la comparaison. Ces études permettent d'aiguiller les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement.

3.2.1 Transformation numérique : stratégies d'entreprise

En lien avec notre contexte général qu'est la quatrième révolution industrielle et l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire, plusieurs chercheurs ont étudié la transformation des entreprises, ainsi que la manière dont ces dernières pourraient bénéficier de cette nouvelle ère. Cette transformation des entreprises est parfois désignée « transformation numérique » ou « transformation des entreprises » – *business transformation* (Allaoui, Bourgault et Pellerin, 2019 ; Issa *et al.*, 2018). Par l'intermédiaire de l'usage du numérique, ces travaux visent à accompagner les entreprises dans leurs changements organisationnels. Comme le font remarquer Issa *et al.* (2018) la transformation numérique touchait au départ la production, puis s'est étendue à l'entreprise dans sa globalité, jusqu'à la chaîne logistique et l'entreprise étendue. Selon notre compréhension, ces changements restent généralement étudiés à un niveau macroscopique de l'entreprise et englobent l'ensemble des éléments constitutifs de son environnement interne et externe.

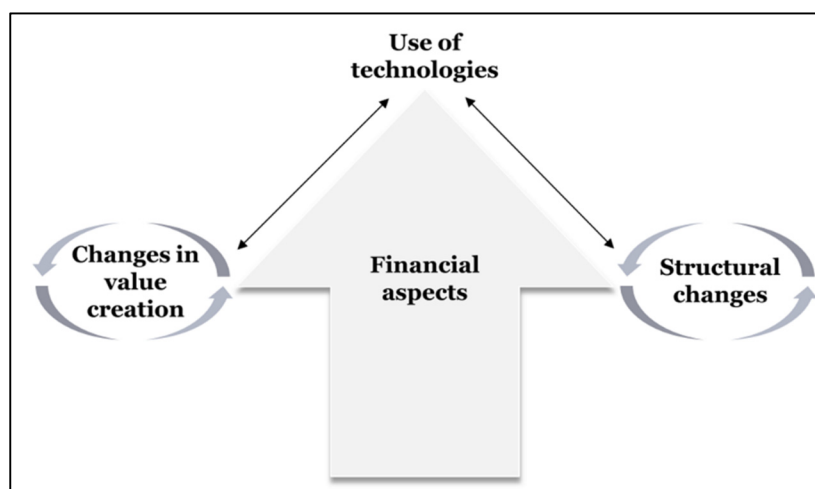


Figure 3.2 *Framework* de transformation numérique :
quatre dimensions essentielles
Tirée de Matt, Hess et Benlian (2015)

Parmi les travaux traitant de la transformation numérique, Matt, Hess et Benlian (2015) proposent un *framework* intégrant quatre dimensions, interagissant suivant le schéma

représenté par la Figure 3.2. Ces quatre dimensions sont des changements portant sur la création de valeur, l'usage de technologies, les changements structurels, soutenus par un investissement financier. Au sein de ces travaux, l'accompagnement que nous envisageons semble être sur le lien entre l'application des technologies aux produits et les changements structurels sur le développement. Cependant, ces aspects restent peu détaillés d'une manière générale dans la littérature traitant de la transformation numérique.




























Parmi les quelques études traitant de la transformation numérique et intégrant une évolution des pratiques de développement, on pourra citer celle de Goerzig et Bauernhansl (2018). Leur étude s'attarde sur la transformation numérique des PME d'ingénierie mécanique, qui à travers l'intégration de composants « numériques » dans leurs produits, peuvent tendre vers le développement de SCP. Parmi les transformations évoquées à différents niveaux, les auteurs proposent de faire évoluer les pratiques de développement de « Waterfall » vers « Agile » (Goerzig et Bauernhansl, 2018).

En synthèse, ces différents travaux offrent un cadre de plus haut niveau dans lequel nos travaux peuvent s'inscrire, en venant proposer une structuration du développement. En effet, certains de ces *frameworks* ont l'avantage d'intégrer différents aspects, dont l'humain, les processus, l'information et les technologies (Allaoui, Bourgault et Pellerin, 2019) qui ne sont pas approfondis dans nos travaux. Toutefois, le développement est généralement traité de manière macroscopique, et l'évolution des pratiques n'est pas détaillée dans les études traitant de la transformation numérique ou d'entreprise. Cela traduit une absence d'accompagnement dans la transformation des pratiques de développement. Il est alors nécessaire d'explorer d'autres types de travaux sur l'accompagnement des entreprises, en resserrant nos recherches sur le développement et l'introduction de nouvelles pratiques.

3.2.2 Guider les entreprises vers de nouvelles pratiques de développement

L'accompagnement des entreprises dans la modification de leurs pratiques de développement peut prendre différentes formes au sein de la littérature scientifique. Cette section propose une synthèse de différents travaux dont la réponse à nos facteurs de positionnement est quant à elle synthétisée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Travaux permettant d'accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs concepts et techniques

Références	Multidisciplinarité	Structuration	Couverture	Navigation	Commentaires
(Schuh, Rudolf et Riesener, 2016)	 Intelligents		Processus / Méthodologie Méthodes Outils } (Faible)	Recommandations pour le développement en lien avec l'Industrie 4.0	Méthodologie Agile est évoquée dans les 8 champs d'actions
(Robin et Girard, 2010)	Non spécifié		Processus (NP) } Processus	Supportée par logiciel	-
(Buchert et al., 2017)	Non spécifié		Processus } Processus (Faible) Méthodes } Méthodes (Importante)	Supportée par logiciel, 7 critères	Utilisent méthode et outil de manière interchangeable
(Krehmer et al., 2009)			Niv. 1 – Main steps } Processus (Importante) Niv. 2 – Detailed steps (NP) } Méthodes Niv. 3 – Partial steps } Outils (Importante)	Risques, genre de dev., type de produit, personnes, charge de travail	-
(Paetzold, 2017)	 SCP		Processus / Logique Macro } Processus Méthodes / Logique Micro } Méthodes Outils / Logique Micro } Outils } (Faible)	Modèle ZOPH et facteurs de contexte	Positionne ces travaux dans l'approche Ingénierie système. Le terme de méthodologie regroupe les processus, méthodes et outils avec un but défini
(Hollauer et al., 2017)	 Mécatronique		Processus } Processus (Importante) Méthode (NP) } Méthodes	Contexte projet et organisationnel	-
(Unger et Eppinger, 2011)	Non spécifié		Processus } Processus (Modérée)	Risques et incertitudes	-
(Vajna, 2005)	Non spécifié		Processus } Processus (Importante) Méthodes et procédures (NP) } Méthodes Outils et aides (NP) } Outils	Ingénierie des processus et supportée par logiciel	-
(Hoppmann, 2009)	Non spécifié		Composants du développement de produit Lean } Méthodes Outils } Outils } (Faible)	Ordre de déploiement	Positionne ces travaux au sein de la pensée Lean et du « Lean Product Development System »
(Vajna et Kittel, 2009)	 (Évoquée)		Méthodes de dev. prod. } Processus Méthodes } Méthodes } (Modérée)	Comparaison sur 25 critères	L'étude compare 7 « product development methods »
(Torry-Smith et Mortensen, 2011)	 Mécatronique		(11) { Processus } Processus Méthodes et procédures } Méthodes Outils } Outils	Comparaison sur 7 critères	Les auteurs emploient aussi les termes de théories et de méthode de méthodologies
(Schuh, Rudolf et Diels, 2015)	Non spécifié		Processus/Méthode } Processus (Faible) Approche } Méthodes	Sélection du processus 5 critères	Emploient les termes d'approche, de processus et de méthode de manière interchangeable
(Paluch et al., 2019)			Modèles/processus } Processus (Importante)	3 critères	Les auteurs emploient aussi les termes « approche », « méthode » « processus », « routine » et « modèle »
(Wilmsen, Dühr et Albers, 2019)	Non spécifié		(NP) { Processus } Processus Méthodes } Méthodes	946 facteurs répertoriés	-
(López-Mesa, 2003)	Non spécifié		Processus de conception } Processus (Faible) Méthodes de conception } Méthodes (Importante)	Outil informatique, caractérisation des méthodes, association aux problèmes et besoins	-
(Stetter et Lindemann, 2005)	Non spécifié		(NP) { Processus } Processus Méthodes } Méthodes Outils } Outils	Démarche en 5 étapes	-
(Birkhofer et al., 2002)	Non spécifié		Processus et Sous-processus (NP) } Processus Méthodes de conception } Méthodes (Importante) Outils (NP) } Outils	Multiples critères au sein du « Process-oriented Method Model »	Les méthodes et outils viennent supporter un sous-processus. Les sous-processus supportent le processus.
(Braun et Lindemann, 2003)	 (Évoquée)		Processus } Processus (Faible) Méthodes } Méthodes (Importante) Outils (NP) } Outils	Sélection, adaptation, et application : « Munich Model of Methods »	Le terme d'outils et le support de ces derniers n'est formalisé que dans le « Munich Model of Methods ». Un type de processus est donné en exemple (VDI2221)
(Brinkkemper, 1996)	Non spécifié		Méthodes } Processus Techniques } Méthodes Outils } Outils } (Importante)	Démarche. Inclut l'environnement du projet	« Méthode » intègre des fragments « processus », et « technique » est une procédure pour soutenir une activité

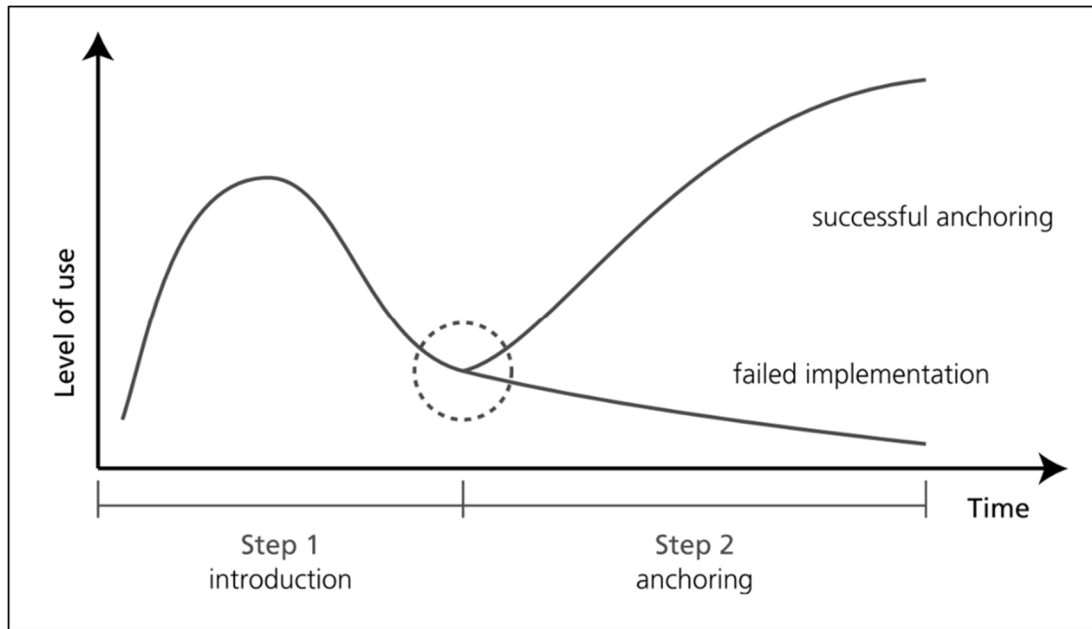


Figure 3.3 Illustration de l'effet escompté de « l'implémentation » : un usage pérenne
Tirée de Stetter et Lindemann (2005) (adaptée de Norell)

En lien avec l'accompagnement des entreprises, il convient de définir ce que nous comprenons par « sélection », « adaptation », « adoption » et « implémentation », termes qui sont réemployés au long de ce chapitre. D'après les travaux de Stetter et Lindemann (2005), présenté dans la suite de cette section, la démarche d'implémentation couvre la sélection, l'adaptation, et l'adoption. Globalement, nous considérerons que la sélection porte sur le choix des concepts et techniques, tandis que l'adoption s'intéresse à la pérennisation de leur usage et application. Par ailleurs, en lien avec leur application, les concepts et techniques disposent de caractéristiques variables et invariables. L'adaptation permet de favoriser l'adoption par la modification des caractéristiques variables en limitant l'altération des bénéfices attendus (Stetter et Lindemann, 2005). En conséquence, l'accompagnement des entreprises au sens où nous l'entendons doit, en plus de la sélection, favoriser une implémentation durable des concepts et techniques. Pour bien comprendre l'articulation entre sélection et adoption, la Figure 3.3 de Norell représentée dans Stetter et Lindemann (2005) montre qu'au-delà de la sélection des concepts et techniques (pouvant être rapprochée du début de l'étape

« introduction »), l'étape de « anchoring » recherche la pérennisation de cette sélection, leur adoption.

Cette précision lexicale étant faite, il ressort du Tableau 3.1 que quelques travaux sont spécifiques au développement de produits multidisciplinaires, mais que les trois types de produits auxquels nous nous intéressons sont présents. Une majorité des travaux démontrent également une structuration plus ou moins formalisée. En termes de niveaux couverts, neuf des dix-neuf travaux considèrent conjointement les niveaux processus, méthode et outil. Enfin, ces travaux étant sélectionnés pour l'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement, ils apportent tous une réponse au facteur de navigation. On notera que parmi les travaux relevés, aucun ne permet de répondre à l'intégralité de nos facteurs de positionnement. En ce sens, les prochains paragraphes reviennent sur des contributions qui se démarquent sur certains facteurs.

Tel que souligné plus haut, l'accompagnement peut prendre différentes formes et nous percevons, dans la caractérisation et la comparaison des concepts et techniques, les prémices d'une sélection et d'un accompagnement. La modélisation des méthodes proposée par Birkhofer *et al.* (2002) et Braun et Lindemann (2003) apparaît comme une caractérisation s'inscrivant dans une optique de standardisation de la représentation des méthodes, ce qui permet par la suite de les comparer et d'effectuer une sélection. Cette représentation permet également une structuration avec les processus et les outils. Cependant, la modélisation est centrée sur le niveau méthode et une variété d'informations doit être collectée en vue d'obtenir une représentation fiable et exploitable.

Les travaux de Paluch *et al.* (2019) nous apparaissent comme une caractérisation et un premier pas vers la comparaison, mais leur apport se limite au continuum entre Étape-jalon et Agile. Sur les comparaisons nous avons répertorié différents travaux (Torry-Smith et Mortensen, 2011 ; Vajna et Kittel, 2009 ; Schuh, Rudolf et Diels, 2015). Toutefois, leur apport reste tout

autant limité dans le cadre de nos travaux du fait du faible nombre de concepts et techniques traités.

Sur la sélection des concepts et techniques, l'étude de Wilmsen, Dühr et Albers (2019) se démarque par la mise en lumière des nombreux critères (946) qui peuvent intervenir dans ce mécanisme. Ces différents critères sont regroupés en 5 catégories, illustrées par la Figure 3.4. Les chercheurs relèvent notamment que les facteurs des catégories « environnement » (rapproché de facteurs externes) et « projet de développement » (rapproché de facteurs internes) ont la plus forte influence sur la sélection des concepts et techniques. De plus, les facteurs en lien avec le « projet de développement » ont une influence sur l'exécution des étapes du processus et des méthodes, ce qui pourra être pris en considération dans nos travaux. À noter que ce regroupement en facteurs internes et externes sera adopté dans nos travaux et expliqué plus loin.

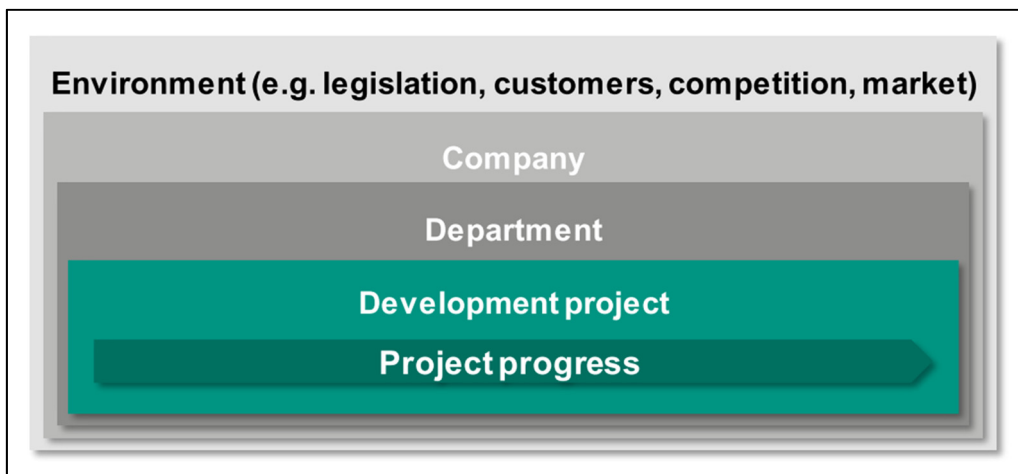


Figure 3.4 Catégories de facteurs pour la sélection de processus et de méthodes de développement de produits
Tirée de Wilmsen, Dühr et Albers (2019)

D'autres formes d'accompagnement plus élaborées ont pu être relevées. Plusieurs travaux s'attardent ainsi sur l'ingénierie des processus (Vajna, 2005 ; Krehmer *et al.*, 2009 ; Hollauer *et al.*, 2017 ; Unger et Eppinger, 2011) et ont l'avantage d'avoir une couverture horizontale

théoriquement importante, parfois au détriment des niveaux méthodes et outils intégrés à leur proposition. Une partie importante des chercheurs semble structurer les différents niveaux, mais les travaux de Vajna (2005) se distinguent par une démarche d'ingénierie des processus, illustrée par la Figure 3.5, qui laisse entrevoir une structuration plus aboutie par les liens entre différentes matrices et une représentation graphique. On notera également sur la Figure 3.5 la mention d'une « banque de méthodes » – *Method bank* – dont l'usage n'est pas détaillé par l'auteur.

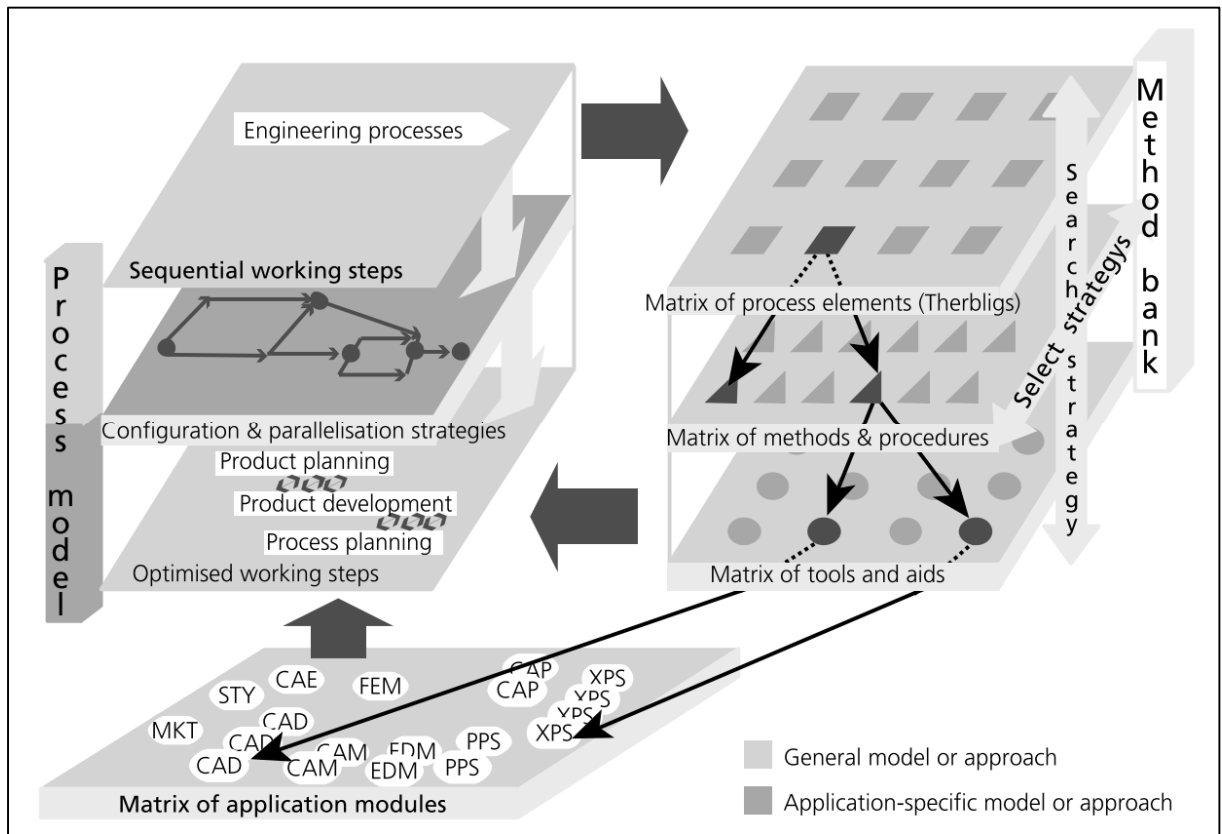


Figure 3.5 Démarche d'ingénierie et de modélisation des processus
Tirée de Vajna (2005)

Krehmer *et al.* (2009) proposent des travaux qui se rapprochent fortement de notre objectif, à travers la conceptualisation du « FORFLOW-process », un processus adapté à une situation donnée, une prise en considération de la multidisciplinarité et une structuration sur trois

niveaux. Toutefois, pour le troisième niveau, composé de 90 étapes partielles, les chercheurs n'explicitent pas comment conduire chacune d'entre elles par l'appui de méthodes ou d'outils. En d'autres termes, ces 90 étapes partielles, bien que générant une couverture horizontale importante, demeurent des tâches dont la réalisation ne semble pas appuyée par des techniques. Hollauer *et al.* (2017) misent également sur une adaptation du processus pour le développement mécatronique à travers un modèle de référence guidé par une démarche qui s'appuie sur une analyse du contexte projet et organisationnel. Ces deux derniers travaux ont pour principale limite un accent mis sur le niveau processus, et moins sur les méthodes et outils pour appuyer le processus proposé. À l'inverse, Paetzold (2017) propose une couverture verticale importante et structurée, en s'inscrivant dans une approche systémique du développement, appuyée par le cycle en V, mais également en s'appuyant sur de l'ingénierie basée sur les modèles¹⁷ – *model-based engineering* – et de l'ingénierie système basée sur les modèles – *model-based systems engineering* (MBSE), eux-mêmes soutenus par des langages et outils de modélisation. Cette proposition pour le développement des SCP s'accompagne du modèle ZOPH¹⁸ (comprendre But, Objet, Processus, Action) afin d'intégrer le processus de développement dans l'entreprise, en relation avec les autres processus et le produit à développer. Toutefois, dans le cadre de ces travaux, c'est la couverture horizontale qui fait défaut.

Toujours en lien avec la littérature scientifique traitant de l'accompagnement, d'autres travaux proposent des lignes directrices (Schuh, Rudolf et Riesener, 2016 ; Hoppmann, 2009), ou conceptualisent un outil informatique (Robin et Girard, 2010 ; Buchert *et al.*, 2017). Cependant, leur apport ne permet pas d'alimenter nos travaux, à l'inverse des constats et propositions de López-Mesa (2003), Stetter et Lindemann (2005) et Brinkkemper (1996), discutés ci-après.

¹⁷ Selon l'auteure, le *model-based engineering* est plus large et englobe le MBSE et le *Business Process Modelling*.

¹⁸ Ziel, Objekt, Prozess, Handlung

López-Mesa (2003) témoigne d'un manque et d'une mauvaise utilisation des méthodes au sein de l'industrie, menant à des résultats non satisfaisants liés à leur usage. En ce sens, López-Mesa (2003) s'est intéressée à leur sélection et leur intégration au sein du processus de développement. Cette sélection s'appuie sur une caractérisation des méthodes appuyée par des lignes directrices. Conjointement, l'auteure s'appuie sur la définition d'un problème à solutionner, et donc du besoin des concepteurs. Les travaux de López-Mesa (2003) bénéficient d'une facilité d'utilisation avec la mise en correspondance de caractéristiques de méthodes avec des besoins et problématiques identifiés. Par ailleurs, l'auteure appuie sa proposition par une liste de 70 méthodes portant sur l'exploration des problèmes, la génération d'idées et l'évaluation des concepts. Cependant, ses travaux ne pourront être transposés immédiatement, car les méthodes étudiées ne sont pas préconisées pour un contexte de développement de produits multidisciplinaires.

Toujours dans la même catégorie, les travaux de Stetter et Lindemann (2005) semblent particulièrement pertinents dans le cadre de nos travaux. Leur démarche générique d'implémentation, illustrée par la Figure 3.6, comporte cinq phases non ordonnées temporellement que sont « l'initiation du processus d'implémentation d'une méthode », « l'analyse du système de développement de produits », « le choix et l'adaptation des méthodes », « l'implémentation des méthodes », et « l'évaluation de l'incidence ». Ces phases couvrent ainsi l'analyse du développement de produits actuel, la sélection, l'adaptation, et intègrent une logique de pérennisation. Par ailleurs, chacune de ces phases est appuyée par des étapes (entre deux et cinq), elles-mêmes appuyées par des « outils » documentés par de la littérature scientifique. Toutefois, leur généricité ne leur permet pas d'approfondir la sélection vis-à-vis de la multidisciplinarité.

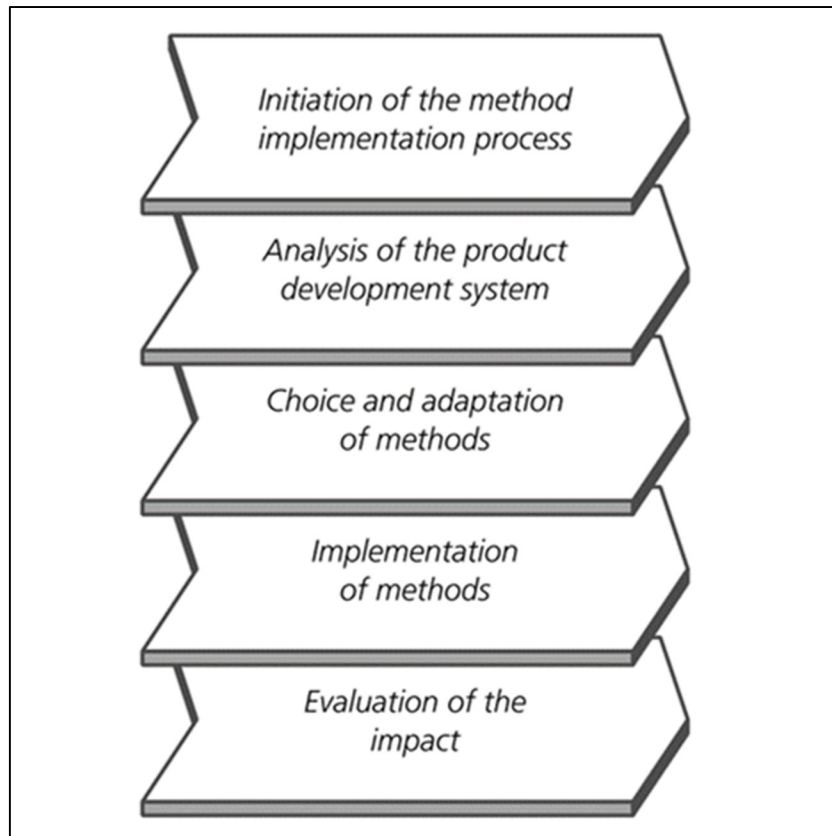


Figure 3.6 Les 5 étapes du modèle d'implémentation des méthodes
Tirée de Stetter et Lindemann (2005)

Les travaux de Brinkkemper (1996) s'appuient quant à eux sur une démarche, illustrée par la Figure 3.7, et dont la finalité est la construction d'une « méthode » adaptée à un environnement et un projet, et générée par l'entremise d'une base de fragments de « techniques, d'outils et de méthodes ». Cette démarche pourrait être abstraite pour générer une structure de développement dans le cadre de nos travaux, et permettre ainsi de dépasser le niveau méthode. Les fragments de « méthodes » étant alors les différents concepts et techniques, il reste alors à constituer une base de concepts et techniques. Cette constitution d'une base de méthodes, au-delà des travaux de López-Mesa (2003), est par ailleurs présente dans les travaux de Birkhofer *et al.* (2002) et de Braun et Lindemann (2003). Il est nécessaire d'explorer ces structures, et la section 3.3 se concentre sur cet aspect.

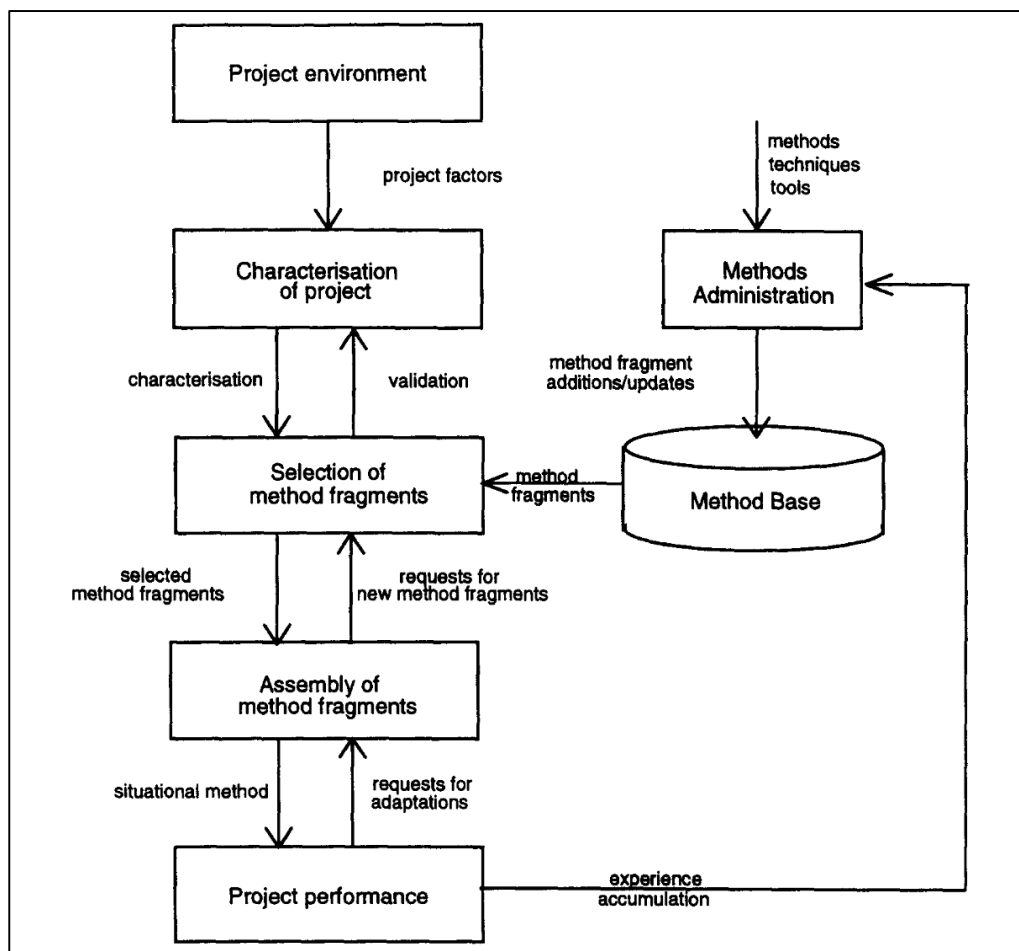


Figure 3.7 Démarche pour la création d'une « méthode situationnelle »
Tirée de Brinkkemper (1996)

En résumé, ces études ont été répertoriées pour leur contribution à l'accompagnement des entreprises vers l'implémentation de nouveaux concepts et techniques. Il apparaît que parmi les travaux présentés, peu traitent de la multidisciplinarité comme enjeu central, et peu portent sur la transition d'un développement de produits traditionnels à un développement de produits multidisciplinaires, ce qui offre une opportunité pour la création de nouvelles connaissances. Il est toutefois possible de capitaliser sur plusieurs briques de connaissances. Bien que le principe de matrices ne soit pas employé dans la suite de nos travaux, au profit d'un formalisme plus graphique, les travaux de Vajna (2005) confirment le besoin de structuration entre les différents niveaux, et la possibilité d'employer une base de méthodes. Cette base de méthodes

est par ailleurs défendue par différents chercheurs (Birkhofer *et al.*, 2002 ; Braun et Lindemann, 2003 ; López-Mesa, 2003 ; Buchert *et al.*, 2017 ; Goevert et Lindemann, 2018). López-Mesa (2003) l'utilise notamment pour effectuer une sélection axée sur la réponse à des besoins et problématiques. Ce principe d'association est intégré à nos travaux. Parmi les autres contributions notables, la démarche de Stetter et Lindemann (2005) nous apparaît comme suffisamment générique pour être adaptée afin d'inclure l'aspect multidisciplinaire, jusqu'alors absent. Cette démarche peut être complétée par la proposition de Brinkkemper (1996) qui peut être adaptée à nos travaux afin de générer une structure de développement à partir d'une base de concepts et techniques et d'une analyse de l'environnement et du projet. Cette analyse fait par ailleurs écho aux travaux de Wilmsen, Dühr et Albers (2019) qui concluent que les facteurs des catégories « environnement » et « projet de développement » ont la plus forte influence sur la sélection.

3.2.3 Synthèse sur l'accompagnement des entreprises dans l'évolution des pratiques

Notre recherche est motivée par l'accompagnement des entreprises dans la transformation de leurs pratiques de développement de produits conjointement à la transition de leurs produits traditionnels vers des produits multidisciplinaires, et ce dans le cadre de l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire. Les recherches qui traitent de la quatrième révolution industrielle ne semblent pas approfondir l'aspect développement de produits et n'apportent qu'un cadre général à notre **objectif principal**. Nous avons donc élargi nos recherches à d'autres études.

Différentes études cherchent ainsi à accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement et alimentent notre **réflexion autour d'une démarche permettant aux entreprises d'identifier et de structurer un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires**. Cependant, un des facteurs limitants reste l'absence de la prise en compte des spécificités propres au développement d'un produit multidisciplinaire, spécificités qui ont motivé nos travaux. Tels que discutés précédemment, les travaux de Krehmer *et al.* (2009)

ainsi que ceux menés par Paetzold (2017), et Hollauer *et al.* (2017) offrent une première piste pour nos travaux et intègrent la multidisciplinarité, mais présentent des limitations qui ont été discutées précédemment, notamment en lien avec une faible couverture des concepts et techniques.

Parmi les travaux ayant retenu notre attention, la proposition de Vajna (2005) alimente notre réflexion autour de la structuration d'un ensemble cohérent de concepts et techniques, de par les liens établis entre les trois niveaux. Enfin, la démarche de Stetter et Lindemann (2005), ainsi que le principe de sélection et de constitution d'une « méthode situationnelle » à partir de fragments de Brinkkemper (1996), et l'association entre les méthodes et des problèmes et besoins (López-Mesa, 2003), sont réutilisées dans nos travaux.

Tel qu'abordé au cours de cette section, certains auteurs défendent le recours à une base de concepts et techniques. La section suivante explore en ce sens les collections de concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires.

























3.3 Organiser et structurer le développement de produits

Cette section synthétise des travaux qui proposent une collection organisée de concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires, et s'attarde ainsi sur des éléments de réponse de notre **objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique**. En effet, à l'inverse de la section précédente, les travaux discutés ci-après offrent une couverture plus importante, permettant de parler d'une collection, d'un catalogue, d'une base, d'un regroupement, ou d'un répertoire de concepts et techniques, parfois aussi dénommés « boîte à outils ». Cette idée n'est pas nouvelle puisque déjà en 1983 Hubka proposait d'explorer cette piste, incluant leur sélection (Hubka, 1983), alors que Salminen et Verho (1992) semblent figurer parmi les premiers à proposer une collection organisée de concepts et techniques pour la mécatronique. Par ailleurs, les travaux discutés ci-après dépassent le cadre des articles de *surveys* (Zheng *et al.*, 2014 ; Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.*, 2016 ; Gericke

et Blessing, 2012 ; Khaitan et McCalley, 2015 ; Tomiyama *et al.*, 2009) qui démontrent qu'il existe une multitude de concepts et techniques, mais qui n'ont pas vocation à les agencer entre eux. Cette absence d'agencement ne permet pas de répondre à notre **objectif spécifique**.

Les différentes études relevées et leur positionnement par rapport aux différents facteurs sont synthétisés dans le Tableau 3.2. À noter que d'autres études de ce type existent, dont certaines sont mentionnées par Goevert et Lindemann (2018), mais ces études ne traitent pas toutes du développement de produits multidisciplinaires, et ne sont pas toutes documentées en anglais ou en français.

Tableau 3.2 Travaux organisant des concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires

Références	Multidisciplinarité	Structuration	Couverture	Navigation	Commentaires
(Salminen et Verho, 1992)	 Mécatronique		Processus  Processus (2) Méthodes  Méthodes (3) Outils  Outils (9)	Oui, conceptualisation de la « metamethodics »	« Méthode » et « Outil » sont utilisés dans différents sens
(Goevert et Lindemann, 2018)	 Mécatronique		Processus (9)  Processus Méthodes (8)  Méthodes (8+) Outils (4)  Outils (4+)	Oui, situation et application	Centrés sur les « techniques Agile »
(Goevert, Brombeiss et Lindemann, 2019)	 Mécatronique		Processus (9)  Processus (1) Méthodes (41)  Méthodes	Oui, validation des méthodes applicables à des tâches spécifiques	Centrés sur un processus générique Agile
(Böhmer, 2018)	 Mécatronique		Approche/Processus/Modèle  Processus (10+) Méthodes de développement  Méthodes (232) (231), outils et framework (1)  Outils	Oui, stratégie d'intégration (organisation, personnes, produit, processus)	Les travaux sont centrés sur les approches Agile
(Miranda et al., 2017)	 Intelligents (S ³)		Processus  Processus (1+) Boîte à outils, techniques, méthodes, outils de réflexion et d'ingénierie  Méthodes } (31)  Outils	Oui, adaptation du processus sur un logigramme	Le processus de développement est un des trois processus du cadre de référence proposé

Ces études intègrent toutes le caractère multidisciplinaire du développement des produits mécatroniques ou intelligents. Elles intègrent également toutes une structuration plus ou moins formalisée. Salminen et Verho (1992), et Miranda *et al.* (2017), Goevert, Brombeiss et Lindemann (2019), ou encore Böhmer (2018) positionnent les techniques sur des étapes du processus discuté. Seuls Goevert et Lindemann (2018) font état d'une structuration plus poussée à travers des matrices d'association entre le processus et les méthodes, puis les méthodes et les outils, d'une manière similaire à ce qui a pu être proposé par Vajna (2005) à la section précédente – voir Figure 3.8. Par ailleurs, les travaux de Goevert et Lindemann

bénéficient d'un nombre important de processus. Toutefois, les chercheurs n'exemplifiant les méthodes et outils propres à un seul des 9 « processus », la couverture sur ces niveaux demeure faible, mais en théorie pourrait s'avérer être importante – suggéré dans le Tableau 3.2 par le « 8+ » et le « 4+ ». La couverture horizontale la plus étendue semble être attribuable à Böhmer (2018) dont la boîte à outils regroupe 231 techniques (méthodes et outils). De notre perspective, ces 231 techniques demeurent hétérogènes et bénéficieraient d'une catégorisation plus fine. Par ailleurs, certaines de ces techniques, de par les références proposées, ne semblent pas avoir été étudiées en contexte de développement multidisciplinaire, à l'inverse de leur proposition principale. Enfin, bien que les travaux de Böhmer proposent une navigation intégrant différentes considérations, cette navigation ne couvre pas la sélection parmi les 231 techniques.

Sur la question de la navigation, parmi les travaux présentés dans cette section, Miranda *et al.* (2017) s'appuient sur un logigramme pour adapter le modèle de processus au produit à développer, allant dans le sens de nos travaux. Pour orienter les entreprises, Goevert, Brombeiss et Lindemann (2019) lient les méthodes et les tâches, avant d'associer ces dernières aux étapes. La navigation proposée relève d'une sélection de méthodes pour le développement mécatronique applicable dans un processus Agile. Toutefois, cette navigation reste moindre par rapport aux travaux proposés en ingénierie des processus à la section précédente qui offrait davantage d'accompagnement. Goevert et Lindemann (2018), par le biais des matrices, conceptualisent un outil informatique interactif qui permet de guider les entreprises dans la sélection des pratiques, ce qui apparaît comme étant le plus avancé de ces cinq travaux, et le plus proche de ce que nous souhaitons accomplir.

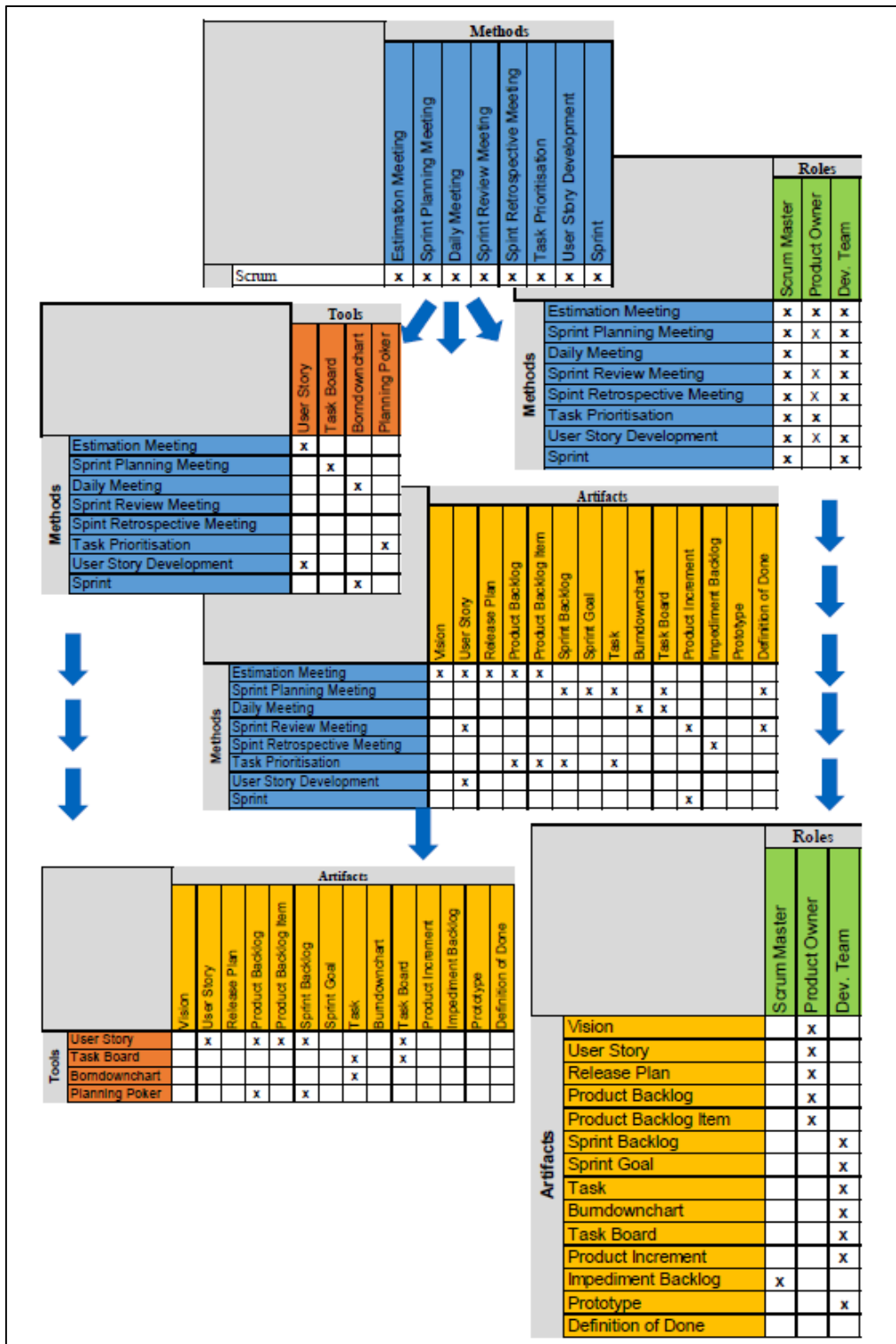


Figure 3.8 Illustration de la structuration par le biais de matrices
Tirée de Goevert et Lindemann (2018)

En synthèse, ces études proposent des regroupements de concepts et techniques structurés, intégrant de surcroît une navigation pour guider les entreprises dans l'exploitation de ces regroupements. Toutefois, bien que proposant une couverture verticale et horizontale notablement plus importante que les études de la section précédente, les études discutées dans cette section demeurent centrées sur les concepts et techniques en lien avec l'Agile (Goevert et Lindemann, 2018 ; Goevert, Brombeiss et Lindemann, 2019 ; Böhmer, 2018), les processus systématiques, tels que le VDI 2221 et VDI 2222 (Salminen et Verho, 1992) ; ou encore dérivé du *New Product Development* (NPD) et de l'*Integrated Product, Process and Manufacturing System Development Reference Model* (IPPM) (Miranda *et al.*, 2017), ce que nous souhaitons dépasser dans le cadre de nos travaux.

La section suivante aborde les études se rapportant à notre objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles.

3.4 Étudier la pratique du développement de produits dans la littérature scientifique

Les sections précédentes ont fait état du développement de produits sous un angle prescriptif à travers l'analyse de la littérature scientifique permettant de répondre à notre **objectif principal** d'accompagnement des entreprises vers l'identification et la structuration d'un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires – Tableau 3.1 – ; puis à notre **objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique** – Tableau 3.2. La présente section a vocation à passer en revue les études documentant la manière dont les entreprises abordent le développement de produits multidisciplinaires, référées ci-après comme les études descriptives, mais parfois retrouvées sous le nom d'études empiriques dans la littérature. Cette section est structurée en trois sections. La première section aborde les études cherchant à documenter le développement de produits sans spécifier *a priori* un groupe de concepts et techniques. La deuxième section aborde des études qui traitent de la sélection et de l'adoption

de concepts et techniques. Enfin, la troisième et dernière section synthétise les manques dans la littérature pour répondre à notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**.

3.4.1 Documenter l'usage de concepts et techniques non spécifiés a priori

Au sein de la littérature, nous distinguons deux catégories d'études, celles qui s'intéressent à l'application de concepts et techniques spécifiés en amont de la collecte de données, et celles qui, à l'inverse, ne spécifient pas des concepts et techniques en amont de la collecte. Cette seconde catégorie est plus en phase avec notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**. En ce sens, nous nous intéressons dans la suite de cette section aux études de cette seconde catégorie à travers une synthèse des études qui analysent l'usage de concepts et techniques dans la pratique industrielle.

Au sein des différentes études recensées dans le Tableau 3.3, quatre études portent sur le développement de produits mécatroniques ou intelligents. Grimheden et Flening (2019) proposent ainsi une étude de cas permettant d'explorer la manière dont une entreprise aborde le développement de produits mécatroniques, mais également les défis auxquels elle fait face. L'étude souligne principalement le recours à un processus hybride de type Agile-étape-jalon. Parmi les trois autres études, celles de Goevert *et al.* (2019), Holler *et al.* (2018) et Hollauer *et al.* (2016) retiennent notre attention, et tout particulièrement cette dernière qui analyse les processus employés au sein de 5 PME et 14 *start-ups*. Il en ressort que les entreprises emploient des processus de plusieurs natures. Au sein des PME, Étape-jalon et le cycle en V combiné avec l'Étape-jalon sont mentionnés. Une des PME ne mentionne aucun processus. Sur les *start-ups*, Scrum, le modèle procédural SPALTEN¹⁹ (Albers *et al.*, 2005) et la norme ISO9000 et 9001 sont mentionnés. Il en ressort également que 6 des 14 *start-ups* ne mentionnent aucun

¹⁹ SPALTEN est l'acronyme allemand pour l'analyse de la situation (Situationsanalyse), la délimitation du problème (Problemeingrenzung), l'identification de solutions alternatives (Alternative Lösungssuche), la sélection de solutions (Lösungsauswahl), l'analyse des conséquences (Tragweitenanalyse), la prise de décision et la mise en œuvre (Entscheiden/Umsetzen) et le récapitulatif et l'apprentissage (Nacharbeiten/Lernen).












processus (Hollauer, Kattner et Lindemann, 2016). Néanmoins, cette étude se limite à la documentation des processus. À ce titre, Goevert *et al.* (2019) et Holler *et al.* (2018) ont l'avantage de couvrir respectivement un et deux niveaux supplémentaires.

Holler *et al.* (2018) explorent l'intégration du numérique au sein des produits traditionnels tangibles pour former les « digitised products », et comment cette évolution se traduit sur les « méthodes ». À travers une étude de cas documentée, les chercheurs soulignent la mise en application de différentes pratiques de développement en lien avec Agile, incluant l'usage d'un processus itératif, du « design thinking » pour l'identification des besoins, du prototypage, ou encore de sprints adaptés de Scrum.

L'étude de Goevert *et al.* (2019) quant à elle, s'intéresse à l'implémentation des approches Agile et comment ces dernières sont employées en coordination avec les méthodes existantes. Toutefois, l'étude ne cherche pas à nommer les différents concepts et techniques employés sur les différents niveaux. L'étude de Sabados *et al.* (2010) souffre du même constat. Bien que répertoriant 36 concepts et techniques, peu sont nommés, et à l'instar de Goevert *et al.* (2019), l'accent est mis sur les pratiques Agile, ce qui ne permet pas de répondre adéquatement à notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**.

Parmi les autres études, les résultats de l'étude quantitative de Gendron *et al.* (2011) nous permettra de comparer nos résultats ; en d'autres termes, de vérifier si notre échantillon reflète les résultats de cette étude ou non : soit que 60% des entreprises interrogées s'appuient sur un « processus de conception structuré », et que 27% utilisent des « méthodes, outils et techniques » (Gendron *et al.*, 2011). Enfin, nous relèverons l'étude de Unger et Eppinger (2009) qui a servi de base à Unger et Eppinger (2011). Cette étude documente les processus employés par 10 entreprises au sein de différentes industries, sans toutefois s'intéresser au développement de produits multidisciplinaires.

Tableau 3.3 Travaux documentant l'usage de concepts et techniques non spécifiés a priori pour le développement de produits au sein des entreprises

Références	Multidisciplinarité	Structuration	Couverture	Navigation	Commentaires
(Grimheden et Flening, 2019)	 Mécatronique		Processus de développement de produit → Processus (Faible)	Non	Processus de type Agile-étape-jalon
(Hollauer, Kattner et Lindemann, 2016)	 Mécatronique		Méthodologie/Engineering design process → Processus (Importante)	Oui, abordée dans l'étude. Concluent qu'elle n'est pas supportée en entreprise	Processus Étape-jalon, Cycle en V, Scrum, SPALTEN, ISO9001 et ISO9000
(Goevert et al., 2019)	 Mécatronique		Approches et techniques [Processus → Processus] [Méthodes → Méthodes] (Modérée)	Oui, abordée dans l'étude sur l'introduction des pratiques Agile	Contexte d'intégration de des approches Agile
(Holler et al., 2018)	 Intelligents		Méthodes (5 groupes) [Modèle de processus /Macro → Processus] [Méthode de travail /Micro → Méthodes] [Outils → Outils] (Importante)	Oui, situation et but	-
(Sabados et al., 2010)	Non spécifié		(36) [Méthodes → Processus] [Processus → Méthodes] [Outils → Outils]	Non	De notre compréhension, leur définition de méthode inclut le processus
(Unger et Eppinger, 2009)	Non spécifié		Processus de développement de produit → Processus (Importante)	Oui, comparaison des processus (itérations et revues de conception)	-
(Gendron et al., 2011)	Non spécifié		Processus de conception (NP) → Processus [Méthodes, outils et techniques (NP) → Méthodes] [Méthodes, outils et techniques (NP) → Outils]	Envisagée par le biais d'un observatoire	Le niveau « Méthodes, outils et techniques » est dissocié en deux niveaux

Au-delà de l'usage des concepts et techniques, trois références nous permettent de défendre la nécessité d'un accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs pratiques. En effet, Goevert *et al.* (2019), Hollauer *et al.* (2016) et Feldmüller (2018) soulignent l'absence d'une démarche formalisée pour la sélection ou l'implémentation de nouvelles pratiques au sein des entreprises. Sur ce point, bien que Feldmüller apporte des connaissances limitées au regard de notre **objectif spécifique d'analyse de pratiques industrielles**, ce qui explique son absence dans le Tableau 3.3, elle soulève également le point de la sélection et de l'adaptation d'un processus hybride²⁰ au produit à développer, parfois en fonction de sa complexité, du projet, et du contexte. Elle observe à ce sujet le fait qu'il n'y ait pas de consensus sur la manière de procéder, et que les entreprises n'utilisent pas de démarche en particulier pour guider cette sélection ou adaptation (Feldmüller, 2018). Cet aspect est davantage exploré dans la section suivante.

²⁰ Les hybridations peuvent être définies comme la combinaison de deux ou plusieurs concepts et techniques, généralement de même niveau, en vue combiner les avantages de chacune, voire d'en dégager de nouveaux (Guérineau *et al.*, 2016).

Enfin, d'un point de vue méthodologique, ces travaux tirent en majorité leurs observations d'études de cas ou d'entrevues, ce qui nous conforte sur le choix des entrevues pour collecter nos données en lien avec l'analyse des pratiques industrielles, présentée au chapitre 6.

3.4.2 Sélection et adoption de concepts et techniques pour le développement de produits







La section précédente a permis de relever des études qui cherchent à documenter la manière dont les entreprises développent leurs produits multidisciplinaires. Cette section aborde les études qui analysent les mécanismes et critères qui pilotent la sélection et l'adoption de nouvelles pratiques par les industriels, contribuant ainsi au second volet de notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**. Les différentes études sont rassemblées dans le Tableau 3.4.

Au sein de la littérature scientifique, l'adoption, au même titre que la sélection, est discutée au regard de facteurs qui portent sur le degré de formalisation du processus, l'implication des départements, la communication (Nijssen et Frambach, 2000), la stratégie d'entreprise (Nijssen et Frambach, 2000 ; Albers *et al.*, 2014 ; Chai et Xin, 2006), l'efficacité avérée et l'utilité de la technique (Albers *et al.*, 2014 ; Nijssen et Frambach, 2000 ; Thia *et al.*, 2005), sa convivialité et la prise en considération de l'humain dans sa création (Thia *et al.*, 2005 ; Albers *et al.*, 2014), le temps d'apprentissage pour sa mise en œuvre, mais aussi de la nature du projet, de l'organisation, du secteur industriel, et des différences culturelles (Thia *et al.*, 2005). Aucun consensus clair ne se dégage sur des facteurs individuels et sur leur influence sur l'adoption. Afin de se détacher de certaines oppositions et d'une hiérarchie entre les facteurs, il nous apparaît possible de les abstraire et de les regrouper entre facteurs internes et externes. Cette catégorisation est employée au sein des travaux de Thia *et al.* (2005).

Parmi les exemples de facteurs sujets à discussion, nous pouvons mentionner la question de la popularité des concepts et techniques, discutée à travers les observations des travaux d'Albers *et al.* (2014), de Nijssen et Frambach (2000), et ceux de Thia *et al.* (2005). Nijssen et Frambach

(2000) soulignent que l'utilité de l'outil doit prévaloir sur sa popularité, ce qui est corroboré par les observations de Thia *et al.* (2005). Toutefois, les observations d'Albers *et al.* (2014) démontrent que les méthodes peu utilisées sont jugées aussi efficaces que les méthodes populaires, mais que l'efficacité et la pertinence de ces dernières sont rarement questionnées en regard des différentes situations. En d'autres termes, en pratique et sur l'échantillon analysé par Albers *et al.* (2014), les méthodes « populaires » demeurent les plus souvent utilisées, bien que dans certaines situations d'autres méthodes puissent s'avérer plus adéquates. Les chercheurs conceptualisent à ce titre un outil informatique pour une sélection basée sur une situation à caractériser. De cette observation nous retiendrons essentiellement une absence de questionnement sur l'efficacité d'une méthode (ou d'un outil) de la part des entreprises. En conséquence, nous devons considérer que cette absence de questionnement pourrait freiner l'implémentation de nouvelles pratiques qui, bien que plus efficaces, ne seraient alors pas sélectionnées et adoptées. Enfin, en lien avec la précision lexicale effectuée précédemment il apparaît ici que la frontière entre adoption et sélection reste parfois floue. La considération de la popularité intervient, à notre sens, au niveau du choix des concepts et techniques.

Tableau 3.4 Travaux documentant la sélection et l'adaptation de concepts et techniques pour le développement de produits au sein des entreprises

Références	Multidisciplinarité	Structuration	Couverture	Navigation	Commentaires
(Araujo Jr., 2001)	Non spécifié		Processus (NP) → Processus Outils → Méthodes } (Importante) → Outils	Oui, modèle d'acquisition	-
(Nijssen et Frambach, 2000)	Non spécifié		Processus → Processus (Faible) Techniques, outils, → Méthodes méthodes (11) → Outils	Oui, facteurs d'adoption	Centré sur le NPD
(Delgado-Hernández, Benites-Thomas et Aspinwall, 2007)	Non spécifié		Méthodologies { Processus → Processus (Modérée) Techniques, outils, → Méthodes méthodes → Outils	Oui, 4 niveaux de complexité produit	Centré sur le NPD
(Thia et al., 2005)	Non spécifié		Processus → Processus (Faible) Techniques et → Méthodes (Modérée) outils → Outils	Oui, facteurs internes et externes	Centré sur le NPD
(Chai et Xin, 2006)	Non spécifié		Processus → Processus (Faible) Techniques et → Méthodes outils (8) → Outils	Oui, facteurs d'adoption	Centré sur le NPD
(Albers et al., 2014)	Non spécifié		Processus (NP) → Processus Méthodes (5 types) → Méthodes (Importante) Outils (NP) → Outils	Oui, supportée par logiciel, situation, coût, budget, ressources humaines	-

En complément, tel que souligné précédemment, l'adoption traduit à notre sens la recherche d'une pérennisation de l'usage des concepts et techniques sélectionnés. Cette adoption et ses différentes considérations associées doivent pour certaines être traitées lors de la sélection. C'est par exemple le cas de la convivialité, de l'utilité, ou encore du temps de mise en œuvre précédemment cités. López-Mesa (2003), mentionnée à la section précédente, quant à elle souligne la prise en compte des conditions limites des concepts et techniques dans la sélection. Ces aspects peuvent apparaître comme périphériques, mais trouvent à notre sens leur importance dans la recherche d'une implémentation réussie.

Au-delà des facteurs, nous retiendrons les travaux d'Araujo Jr. (2001) qui établissent un modèle pour l'acquisition à partir d'une étude s'appuyant sur des questionnaires et entrevues. L'acquisition est définie par l'auteur comme « the process followed by companies from becoming aware of a tool, until its adoption » (Araujo Jr., 2001). Leur modèle d'acquisition, assimilé à une démarche, mène ainsi à l'adoption d'un nouvel « outil », et intègre sa sélection, une prise en considération des facteurs internes et externes, et débute par l'identification de problèmes. Cette démarche générique avec des points de passage fait pour nous écho aux travaux de Stetter et Lindemann (2005) sur l'implémentation, et à ceux de López-Mesa (2003), à travers l'identification de problèmes comme point de départ. Toutefois, Araujo Jr. (2001) aborde en partie le processus d'acquisition comme un acte d'achat, à travers l'analyse des processus décisionnels, psychologiques (incluant par exemple les croyances, attitudes et comportements des équipes dans le processus d'acquisition), l'influence du marketing et l'attitude du consommateur ; ce qui diffère de ce que nous souhaitons proposer. La démarche de Stetter et Lindemann (2005) s'avère en ce sens être plus générique et bénéficie de différents « outils » pour appuyer les différentes étapes, dont chacune est appuyée par de la littérature.

Albers *et al.* (2014), au-delà des facteurs, doivent également être mentionnés car leurs travaux s'inscrivent dans la même mouvance que les nôtres. Les chercheurs cherchent en effet à favoriser l'usage d'une plus grande variété de méthodes et d'outils du fait d'une exploitation insuffisante de leur variété et du potentiel associé. Dans une direction similaire, Nijssen et

Frambach (2000) préconisent une sélection d'outils complémentaires, pouvant donner lieu à l'adoption de « boîtes à outils » (Nijssen et Frambach, 2000), ce qui se traduit l'internalisation d'une variété d'outils. Parmi les autres faits saillants, à travers la mention de la formalisation du processus comme catalyseur de l'adoption, Nijssen et Frambach (2000) nous renseignent indirectement sur un ordre à privilégier pour la mise en place de nouvelles pratiques avec en premier lieu le processus, puis les méthodes et outils.

Enfin, Delgado-Hernández, Benites-Thomas et Aspinwall (2007) semblent aller dans le sens de nos travaux en démontrant que la variété de produits au sein d'une entreprise ne peut être développée d'une manière unique. Pour appuyer cette observation, les chercheurs s'appuient sur deux types de complexité du produit. La première évalue la structure interne du produit en lien avec la production ; la seconde, en lien avec l'utilisateur, traduit la complexité des critères de performance. De ces deux critères et de leurs deux niveaux respectifs émergent quatre catégories auxquelles peuvent être associées des pratiques de développement, qui ne sont toutefois pas décrites.

En résumé, bien que la multidisciplinarité ne soit pas abordée dans ces études descriptives, elles viennent consolider nos connaissances sur la sélection et l'adoption de concepts et techniques au sein des entreprises, et consolident en ce sens les connaissances discutées à la section 3.2.2. Il en ressort que toutes ces études intègrent trois niveaux, bien qu'en général s'intéressant principalement aux niveaux méthodes et outils. La littérature scientifique qui s'intéresse au NPD au sein des entreprises (Delgado-Hernández, Benites-Thomas et Aspinwall, 2007 ; Thia *et al.*, 2005 ; Nijssen et Frambach, 2000 ; Chai et Xin, 2006), contrairement à celle portant sur le développement multidisciplinaire, semble avoir une compréhension poussée des facteurs d'adoption des méthodes et outils. Il en ressort donc une opportunité pour créer de nouvelles connaissances sur la manière dont les entreprises s'adaptent au développement de produits multidisciplinaires.

3.4.3 Synthèse de la littérature scientifique relative à la pratique industrielle du développement de produits

La section 3.4 a permis de mettre en lumière différentes études descriptives traitant, d'une part, des pratiques de développement et, d'autre part, de la sélection et de l'adoption des concepts et techniques. D'une manière générale, il en ressort que la multidisciplinarité est rarement discutée au sein des études recensées.

Pour les études traitant des pratiques de développement, les études de Hollauer *et al.* (2016) et de Goevert *et al.* (2019), ainsi que Holler *et al.* (2018) constituent les études les plus proches de notre objectif spécifique **d'analyse des pratiques industrielles**. L'étude de Hollauer *et al.* (2016) se démarque par l'identification et la dénomination des processus employés par les entreprises. Cependant, ces informations se limitant au processus, elles ne nous permettent pas de cartographier la manière dont les entreprises organisent le développement de leurs produits multidisciplinaires. Quant aux travaux de Holler *et al.* (2018), leur étude ne documente qu'une étude de cas unique. Il est donc difficile de s'appuyer sur la littérature existante, et des données doivent être collectées afin de pouvoir cartographier la manière dont les entreprises développent leurs produits multidisciplinaires.

Parmi les autres observations pertinentes au regard de nos travaux, plusieurs auteurs (Feldmüller, 2018 ; Hollauer, Kattner et Lindemann, 2016 ; Goevert *et al.*, 2019) ont souligné que peu d'entreprises semblent disposer d'une démarche qui pilote l'évolution des pratiques de développement, notamment en ce qui a trait à la sélection et l'adaptation (Feldmüller, 2018). Cette absence permet de justifier la proposition d'une démarche d'accompagnement. Par ailleurs, aucune des études mentionnées ne semble s'être attardée au passage d'un développement de produits traditionnels à un développement de produits multidisciplinaires. Nous entrevoyons dans l'étude de cette transition une opportunité d'apporter une contribution originale en s'attardant sur l'évolution des pratiques de développement.

Enfin, les études analysées en 3.4.2 nous renseignent sur l'adoption des concepts et techniques et les facteurs associés. Cette adoption, conjuguée à la sélection, nous permet de parler d'implémentation, et apparaît comme une dimension supplémentaire à l'accompagnement. Il se dégage ainsi de ces différentes études que les facteurs internes et externes jouent un rôle dans l'adoption des concepts et techniques (Thia *et al.*, 2005 ; Araujo Jr., 2001 ; Chai et Xin, 2006 ; Nijssen et Frambach, 2000). Cela semble aller dans le sens des facteurs « environnement » et « projet de développement », pouvant être assimilés aux facteurs externes et internes, et évoqués comme ayant une influence forte sur la sélection par Wilmsen, Dühr et Albers (2019). Ainsi, sélection et adoption bénéficient toutes deux de la caractérisation des facteurs externes et internes. Sur la base de ce lien entre les études descriptives et les études prescriptives précédemment abordées, nous nous questionnons dans la section suivante sur les études comparant ces deux aspects.

3.5 Comparer la littérature scientifique avec les pratiques industrielles

Dernier de nos objectifs spécifiques, la **comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles** nous apparaît comme requise. Tel que mentionné, l'étude descriptive nous renseigne sur la situation actuelle, tandis que l'étude prescriptive présume d'un « idéal » à atteindre. La comparaison de ces deux aspects permet d'identifier les écarts et similarités, et pourrait permettre de mieux orienter les entreprises. Dans les faits cette comparaison est discutée dans certains articles, mais peu d'articles proposent une analyse approfondie sur ces deux aspects.

Parmi les différentes études abordées au cours de ce chapitre, certaines études prescriptives s'appuient sur des études descriptives. C'est notamment le cas de Unger et Eppinger, des travaux menés par Goevert, ou encore Hollauer (Hollauer *et al.*, 2017 ; Hollauer, Kattner et Lindemann, 2016 ; Unger et Eppinger, 2009 ; Unger et Eppinger, 2011 ; Goevert et Lindemann, 2018 ; Goevert *et al.*, 2019 ; Goevert, Brombeiss et Lindemann, 2019). Ainsi, sur la base d'observations issues des pratiques industrielles, leurs auteurs visent à combler un écart

par la mise en place d'éléments de réponse ou d'une proposition. Ces études alimentent notre réflexion autour d'une démarche d'accompagnement et de corroborer notre méthodologie de recherche.

La limite de ces comparaisons reste cependant identique à chacune des études conduites individuellement. En effet, les concepts et techniques abordés dans les différents travaux menés par Goevert restent centrés sur Agile, là où nous défendons une perspective plus large en termes de couverture horizontale, aspirant à englober une variété plus importante de concepts et techniques. De la même manière, dans les travaux de Unger et Eppinger (Unger et Eppinger, 2009 ; Unger et Eppinger, 2011), et ceux menés par Hollauer (Hollauer, Kattner et Lindemann, 2016 ; Hollauer *et al.*, 2017), le manque de couverture verticale reste un élément limitant pour la finalité de nos travaux. En synthèse, ces études apportent des éléments de réflexion intéressants, et nous nous plaçons dans une finalité commune, celle d'accompagner les entreprises, en ayant documenté comment ces dernières développent des produits afin de formuler des recommandations. La dernière section de ce chapitre vise à synthétiser et affirmer notre positionnement.

3.6 Synthèse : notre positionnement

Ce chapitre a permis de passer en revue différents travaux issus de la littérature scientifique, ce qui nous a permis d'identifier des connaissances relatives à nos objectifs et de préciser certains manques. À travers l'identification de ces derniers, nous tentons au sein de cette section d'établir le positionnement de nos travaux. Pour cela nous nous appuyons sur les différentes synthèses intermédiaires, ainsi que sur la Figure 3.9 qui synthétise les briques de connaissances réutilisables, les manques et notre positionnement. Le code couleur utilisé au long de ce chapitre et introduit au chapitre précédent lors de la présentation des objectifs et de la méthodologie est réemployé. Ainsi, l'orange correspond à **l'objectif principal d'accompagnement des entreprises**, le rouge à la **comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles**, le vert à la **cartographie de la littérature**

scientifique, et le bleu à **l'analyse des pratiques industrielles**. Notre positionnement, représentant le cœur de ce chapitre, est indiqué par l'encadré gris à traits pointillés, au sein duquel on retrouve le découpage par objectif, ainsi que les encadrés noirs qui récapitulent notre positionnement sur chacun d'eux. Les encadrés blancs soulignent la réappropriation de briques de connaissances au sein des objectifs. À gauche de l'encadré gris à traits pointillés, on retrouve les synthèses intermédiaires qui, à l'aide des symboles « + » et des « - », renseignent respectivement sur les connaissances existantes et allant dans le sens de nos travaux, et sur les manques identifiés permettant de nous positionner.

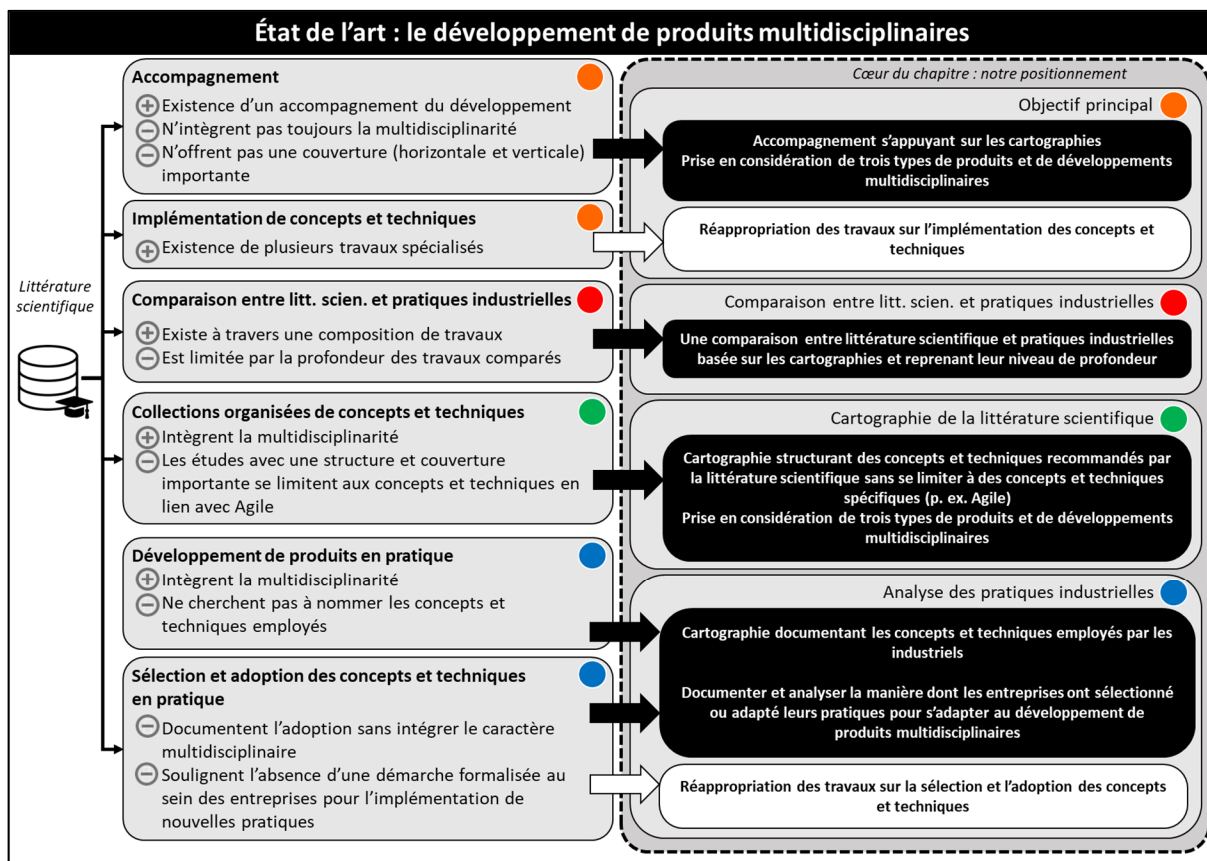


Figure 3.9 Synthèse du chapitre 3 : identification des connaissances, des manques et positionnement relatif à nos différents objectifs

Sur notre **objectif principal d'accompagnement**, nous avons constaté l'existence de plusieurs travaux qui poursuivent une finalité d'accompagnement de la transformation du développement des entreprises, dont certains ont intégré l'aspect multidisciplinaire (Krehmer *et al.*, 2009 ; Paetzold, 2017 ; Hollauer *et al.*, 2017). Ces études participent à notre réflexion sans pour autant apporter une réponse totale, du fait de l'absence d'une couverture horizontale et verticale importante – encadré gris « accompagnement ». En termes de positionnement – première case noire en partant du haut –, nos travaux se distinguent par un accompagnement basé sur les cartographies de la littérature scientifique bénéficiant d'une couverture horizontale et verticale importante comme élément de structuration du développement, incluant trois types de produits. L'usage des cartographies de la littérature scientifique s'intègre dans une démarche plus large qui réutilise des éléments décrits dans le prochain paragraphe.

Toujours en lien avec notre **objectif principal d'accompagnement** des entreprises, nous nous sommes intéressés à l'adoption de concepts et techniques – encadré « implémentation de concepts et techniques ». Nous avons noté que différents articles sur la sélection et l'adoption, ainsi que d'autres travaux proposant une démarche, débutent par l'identification d'un défi, généralement un besoin spécifique ou une problématique donnée (Araujo Jr., 2001 ; López-Mesa, 2003 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Braun et Lindemann, 2003). De plus, les facteurs internes et externes doivent être considérés dans la sélection et l'adoption des concepts et techniques (Wilmsen, Dühr et Albers, 2019 ; Thia *et al.*, 2005). Ces deux points sont conservés dans nos travaux, étant récurrents et proposés par des études qui abordent la sélection comme enjeu central. Bien qu'une des limitations reste le manque de prise en considération des aspects relatifs à la multidisciplinarité, nous retenons également que les démarches conceptualisées par Brinkkemper (1996) intégrant le principe de sélection à partir d'une base de « fragments », ainsi que la démarche générique de Stetter et Lindemann (2005), alimentent nos travaux – première case blanche de réappropriation de connaissances.

L'objectif spécifique de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles a été discuté à la section précédente et est représenté ici par la troisième case

grise à gauche marquée d'un cercle rouge. Il est en grande partie alimenté par une composition de travaux qui ont été présentés dans les sections précédentes. On notera à ce titre que les travaux menés par Hollauer, Goevert, et nos travaux poursuivent un but similaire, ce qui tend à renforcer l'existence d'un réel besoin d'accompagnement et de transformation de pratiques de développement au sein de l'industrie. Cependant, la profondeur des comparaisons existantes reste limitée par la profondeur des études menées individuellement. Or ces études prises individuellement ne permettent pas de répondre en totalité à nos objectifs spécifiques **de cartographie de la littérature scientifique et d'analyse des pratiques industrielles**. Notre apport, résumé dans l'encadré noir, porte ici sur une comparaison basée sur les cartographies de la littérature scientifique et des pratiques industrielles qui se distinguent par une couverture plus importante, et *in fine* se traduisant par une comparaison bénéficiant d'une profondeur plus développée.

En lien avec notre objectif spécifique **de cartographie de la littérature scientifique**, représenté par la case grise marquée d'un cercle vert, il ressort que les études offrant une couverture importante restent centrées sur les concepts et techniques Agile. Nos travaux aspirent à dépasser cette limitation, en cartographiant la littérature scientifique de trois types de produits multidisciplinaires. De plus, à notre connaissance, il n'existe pas de travaux qui centralisent et cartographient les concepts et techniques relatifs à ces trois types de produits, ce qui en fait un élément distinctif important. De surcroît, afin de défendre l'originalité des cartographies, il apparaît que peu d'auteurs formalisent une structuration graphique entre les différents niveaux (Vajna, 2005 ; Goevert et Lindemann, 2018 ; Birkhofer *et al.*, 2002 ; Braun et Lindemann, 2003) et constituent une base organisée de concepts et techniques. Lorsque celle-ci est réalisée, elle se limite en général à quelques éléments et relève alors davantage de la conceptualisation ou de l'exemplification sans créer de base de concepts et techniques exploitable. Ce besoin de constituer une base organisée de concepts et techniques est souligné par plusieurs auteurs – mentionnés au 3.2.3. La cartographie joue en ce sens un rôle double en permettant de représenter visuellement l'étendue des concepts et techniques discutés par la littérature, mais aussi de constituer une base structurée de concepts et techniques pouvant être

reprise pour l'accompagnement. Les cartographies de la littérature scientifique et des pratiques industrielles sont un moyen de répondre à nos objectifs spécifiques.

Pour paraphraser Spitas (2011) : « We prescribe, but does the industry follow? ». À travers l'apparition de l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire et l'évolution des produits associée, il peut être nécessaire d'étudier le développement à travers un prisme « pratique » afin de comprendre la manière dont les entreprises travaillent, ainsi que la manière dont les entreprises se sont adaptées à ces changements. C'est sur ces deux points que notre apport se situe, résumé dans l'encadré noir associé au cercle bleu. En effet, la section 3.4.1 a montré qu'aucune référence ne permettait de documenter et cartographier la manière dont les entreprises développent leurs produits multidisciplinaires en termes de processus, méthodes et outils employés – représenté par la première case grise à gauche marquée d'un cercle bleu. Enfin, sur la sélection et l'adoption des concepts et techniques – deuxième case grise à gauche marquée d'un cercle bleu –, de la même manière que sur les travaux prescriptifs, les travaux descriptifs répertoriés n'intègrent pas ou peu le caractère multidisciplinaire. Toutefois, certains travaux sur l'adoption de concepts et techniques apportent des briques de connaissances qui pourront être réemployées (Araujo Jr., 2001 ; Albers *et al.*, 2014 ; Thia *et al.*, 2005), représentées par l'encadré blanc de réappropriation de briques de connaissances.

À travers le travail d'analyse puis d'homogénéisation des termes permettant de qualifier la couverture, nous avons constaté une grande variabilité dans l'usage des termes permettant de qualifier différents éléments du développement de produits. Il nous apparaît alors nécessaire de caractériser de manière rigoureuse chacun des concepts et techniques utilisés lors du développement. Le chapitre 4 porte ainsi sur cette recherche de précisions, avant de proposer notre modèle en quatre niveaux et son logigramme associé, qui servira de base aux chapitres suivants.

CHAPITRE 4

LE MODÈLE EN QUATRE NIVEAUX : STRUCTURER LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS

Le chapitre précédent a permis de présenter un état de l'art organisé autour des volets littérature scientifique et pratiques industrielles et de positionner nos travaux. Ce chapitre a pour objectif de proposer une base commune pour la comparaison de ces deux volets. Il permet ainsi de surmonter les variations dans l'usage des termes relatifs aux différents concepts et techniques relevées au chapitre précédent. Pour ce faire, différents modèles en provenance de la littérature sont discutés, avant de présenter les raisons qui nous ont poussés à proposer un nouveau modèle en quatre niveaux. Les définitions et l'arbre décisionnel nécessaires à l'exploitation de ce modèle sont également présentés à la fin de ce chapitre.

4.1 Nécessité d'un nouveau modèle de structuration des concepts et techniques

En vue de comparer les résultats de nos études de la littérature scientifique et des pratiques industrielles, un modèle permettant d'organiser de manière systématique la variété de concepts et techniques est nécessaire. Au sein de la littérature, différents termes cohabitent en vue de désigner individuellement certains de ces concepts et techniques existants. Parmi ces termes fréquemment utilisés, on retrouve « framework », désignant un cadre généralement informatisé pour l'opérationnalisation de concepts ou de techniques ; on retrouve également les termes de méthodologie, de méthode, d'outils, de processus, d'approche, de démarche, de pratique, de technique, dont certains sont utilisés de manière interchangeable. À cet effet, Stark liste différents termes qui sont régulièrement employés comme synonymes de « méthode ». Ces termes sont ceux de « techniques », « approaches », « practices », « programs », « how to's », « methodologies », « work methods » et « best ways » (Stark, 2016). Araujo Jr. (2001) établit un constat similaire en listant une série de termes employés au sein de la littérature et parfois utilisés pour définir le même concept ou technique. Ces termes sont ceux de « approaches », « tools », « guidelines », « models », « working principles », « procedures »,

« representations », « standards », « steps », « techniques », « methods » et « methodologies ». Cela suggère l'absence d'un vocabulaire unifié, portant à confusion, et *in fine*, comme le mentionne Araujo Jr. (2001), un manque de compréhension de l'usage du concept ou de la technique. Selon Araujo Jr. (2001), ce manque d'homogénéité entre les termes utilisés émerge des différentes disciplines impliquées pendant le développement, et du fait que chacune de ces disciplines a également évolué, individuellement des autres. Ce constat a également pu être vérifié à travers la lecture de documents scientifiques. Nous avons pu constater le peu d'articles qui explicitent ces définitions, rendant l'application des travaux parfois incertaine. En effet, cela porte à confusion sur la nature du concept ou de la technique réellement abordé.

Ce manque d'unicité et cette interchangeabilité des termes nous ont motivés à explorer davantage la littérature en vue d'apporter une systématité dans l'usage des termes au sein de nos travaux, dans un premier temps à travers la recherche de définitions, puis de modèles structurés. Ces recherches sont synthétisées à la section suivante.

4.1.1 Définitions et modèles de structuration des concepts et techniques

Premièrement, nous avons listé de manière non exhaustive les définitions de **processus** (Schabacker, Szélig et Vajna, 2013 ; Davila, 2000 ; Paetzold, 2017 ; Unger et Eppinger, 2011 ; Gericke et Blessing, 2012 ; Electronic Industries Alliance - EIA, 1999 ; Araujo Jr., 2001), **méthode** (Wynn et Clarkson, 2005 ; Hubka, 1983 ; Cross, 2005 ; Brinkkemper, 1996 ; Gericke et Blessing, 2012 ; Electronic Industries Alliance - EIA, 1999 ; Araujo Jr., 2001 ; Salminen et Verho, 1992), **méthodologie** (Hubka, 1983 ; Araujo Jr., 2001 ; Brinkkemper, 1996), ou encore de **technique** (Brinkkemper, 1996 ; Araujo Jr., 2001), **outils** (Brinkkemper, 1996 ; Araujo Jr., 2001), **procédure** (Araujo Jr., 2001) et « **principes de travail** » (Hubka, 1983). Toutefois, le manque de relation entre ces définitions ne permet pas de constituer un modèle permettant d'organiser la variété de concepts et techniques. En conséquence, nous avons répertorié et exploré des modèles qui définissent et qui agencent différents concepts et techniques pour la structuration du développement de produits.

Certains de ces modèles sont intégrés dans des articles précédemment introduits au chapitre 3, notamment au sein des travaux de Vajna (2005) – voir Figure 3.5 –, de Goevert et Lindemann (2018) ou encore ceux de Albers *et al.* (2014). Ces chercheurs formalisent une hiérarchie entre processus, méthodes et outils, mais ne définissent pas l’ensemble des termes.

Estefan (2008) semble également défendre cet agencement hiérarchique entre ces trois niveaux à travers un processus appuyé par les méthodes, elles-mêmes soutenues par les outils. Le chercheur reprend les travaux de Martin pour définir ces trois termes qui sont ensuite positionnés les uns par rapport aux autres au sein d’un modèle représenté par la Figure 4.1. Processus, méthode et outil sont alors définis de la manière suivante par Estefan (2008) :

A Process (P) is a logical sequence of tasks performed to achieve a particular objective. A process defines “WHAT” is to be done, without specifying “HOW” each task is performed. The structure of a process provides several levels of aggregation to allow analysis and definition to be done at various levels of detail to support different decision-making needs.

A Method (M) consists of techniques for performing a task, in other words, it defines the “HOW” of each task. (In this context, the words “method,” “technique,” “practice,” and “procedure” are often used interchangeably.) At any level, process tasks are performed using methods. However, each method is also a process itself, with a sequence of tasks to be performed for that particular method. In other words, the “HOW” at one level of abstraction becomes the “WHAT” at the next lower level.

A Tool (T) is an instrument that, when applied to a particular method, can enhance the efficiency of the task; provided it is applied properly and by somebody with proper skills and training. The purpose of a tool should be to facilitate the accomplishment of the “HOWs.” In a broader sense, a tool enhances the “WHAT” and the “HOW.” Most tools used to support systems engineering are computer- or software-based, which also known as Computer Aided Engineering (CAE) tools.

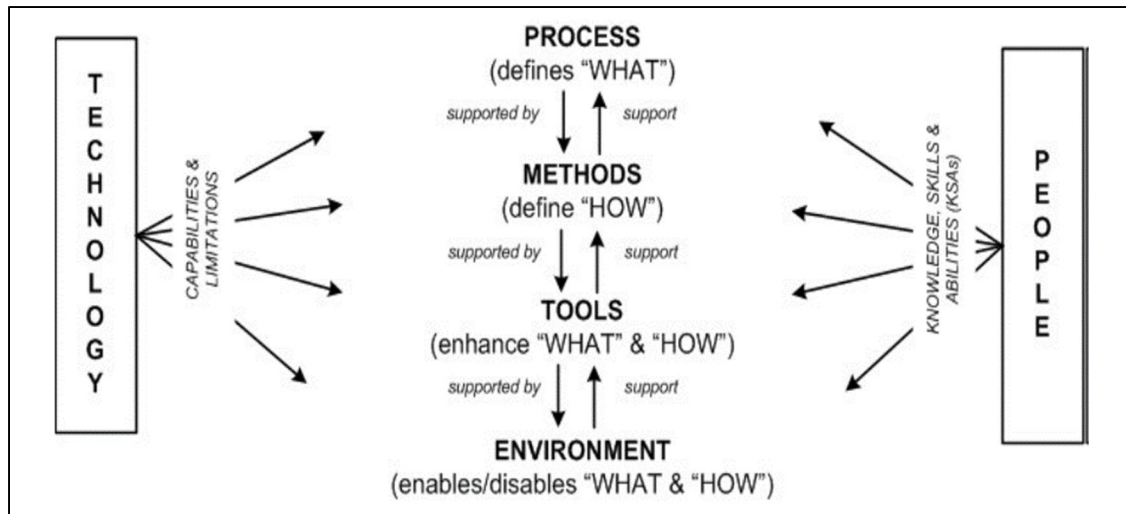


Figure 4.1 Agencement du processus, des méthodes, des outils et de l'environnement, et l'influence des facteurs technologiques et humains sur cet agencement
Tirée de Estefan (2008)

Le processus détermine ainsi l'ordre logique des tâches à réaliser pour arriver au résultat final sans pour autant définir comment chacune des tâches sera réalisée. La méthode est un regroupement de techniques permettant d'assurer la réalisation des tâches du processus et appuie ainsi ce dernier. La méthode est également un processus en soi, dépendamment du niveau d'abstraction. Cela donne une dimension réursive au modèle, également présente chez Vajna (2005) à travers le processus et le sous-processus. L'outil est perçu comme un instrument à destination d'une personne pour lui permettre d'améliorer l'efficacité de certaines méthodes, mais également le processus. L'outil semble être présumé comme informatique ou informatisé. Ces définitions prenant également place dans un contexte d'ingénierie système (IS), certains éléments sont communs avec la définition de l'EIA632, tels que la séquence de tâches pour le processus, ou encore l'orientation sur le « comment » de la réalisation de chaque tâche par la méthode. Enfin, à cela s'ajoute la notion d'environnement de projet qui a pour objectif d'intégrer et de soutenir les méthodes et outils déployés. L'environnement, qui regroupe les facteurs, acteurs et conditions externes (sociales, culturelles, individuelles, physiques, organisationnelles ou fonctionnelles), peut alors agir comme un catalyseur ou un inhibiteur.

Le modèle inclut également une représentation des facteurs technologiques et humains qui viennent influencer cet agencement de termes.

En complément, et sur la base de ces définitions, le terme de méthodologie est également introduit, mais n'est pas représenté sur le modèle. Une méthodologie est alors « a collection of related processes, methods, and tools ». Une méthodologie est « essentially a 'recipe' and can be thought of as the application of related processes, methods, and tools to a class of problems that all have something in common ». De notre compréhension, la méthodologie vient alors créer une structure de développement en vue de conduire la totalité ou une partie du développement d'un produit.

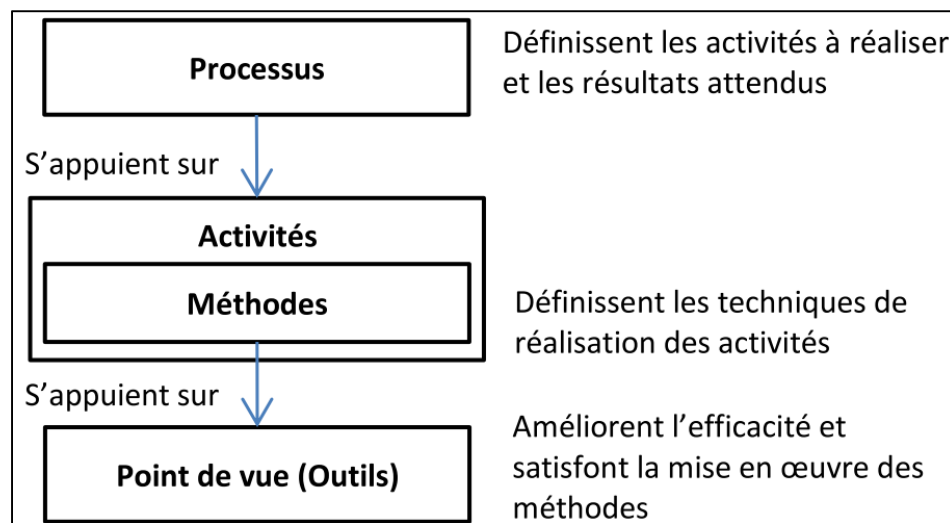


Figure 4.2 Agencement hiérarchique entre processus, méthodes et outils
Tirée de Legendre, Lanusse et Rauzy (2016)

Cette structure hiérarchique en trois niveaux, où le processus est appuyé par les méthodes, elles-mêmes soutenues par les outils est également discutée par Legendre, Lanusse et Rauzy (2016) et représenté par la Figure 4.2. Pour le processus, les auteurs s'appuient sur la définition de l'ISO9000-2000, « un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie ». Chacune des activités du processus peut ensuite se baser sur l'application d'une méthode. Les méthodes semblent alors définir « les techniques

de réalisation des activités ». Enfin les méthodes peuvent s'appuyer sur les points de vue, les outils qui permettent alors « d'améliorer l'efficacité et de satisfaire la mise en œuvre des méthodes ».



Figure 4.3 Vue hiérarchique des trois niveaux
Tirée de Mann (2010)

Ces différents modèles présentés jusqu'ici agencent de manière hiérarchique le processus, les méthodes et les outils. Toutefois, d'autres modèles de structuration des concepts et techniques peuvent être rencontrés. Dans un contexte d'innovation systématique, Mann (2010) organise trois niveaux que sont les outils, la méthode et la philosophie, représentés au sein de la Figure 4.3. Les outils peuvent être utilisés individuellement ou être conjugués en vue de constituer une méthode. La méthode est perçue comme permettant d'achever une procédure systématique, aidant à définir la situation, ce qui doit être fait pour l'améliorer, jusqu'à atteindre sa résolution par une solution adéquate. Enfin, le troisième niveau, la philosophie est le terme adopté afin de regrouper des concepts et idées de haut niveau qui influencent la manière d'utiliser la méthode et les outils. La philosophie régit ainsi l'usage de méthodes et d'outils. Au sein de ce modèle, on retrouve également la relation hiérarchique et de soutien

mutuel entre la méthode et les outils, précédemment décrite par Vajna (2005), Estefan (2008), Albers *et al.* (2014), et Legendre, Lanusse et Rauzy (2016).

Dernier des modèles répertoriés, Adams (2015), dans un effort d'organisation des termes scientifiques, propose une vision englobant les termes de paradigme, philosophie, méthodologie, méthode et technique. Ces termes sont représentés sur la Figure 4.4 et sont ordonnés du plus conceptuel et haut niveau au plus prescriptif, ciblé et explicite. L'auteur propose ainsi des définitions génériques avant de les spécialiser à l'ingénierie. Le paradigme est alors défini comme « the whole network of theories, beliefs, values, methods, objectives, professional and educational structure of a scientific community », et celui auquel nous nous intéressons est celui de « l'ingénierie et technologie ». En ce sens, d'une manière appliquée au paradigme de l'ingénierie et des technologies, la philosophie se compose d'un ensemble de connaissances génériques d'ingénierie, et d'ensembles de connaissances pour les différentes disciplines d'ingénierie – tel que l'ingénierie système ou encore le développement logiciel. La méthodologie est quant à elle perçue comme le niveau intermédiaire entre la philosophie et les aspects techniques, et joue en ce sens un rôle de passerelle entre les niveaux abstraits et ceux appliqués. La méthodologie appliquée à l'ingénierie est perçue comme « a framework or model that focuses the actions of human beings that are attempting to define an object, device, process, or system in order to provide the details required to effect construction, assembly, and implementation for use ». La méthodologie guide ainsi l'exécution, le suivi et la réalisation de tâches techniques dans la conception de l'artéfact, permettant d'entrevoir un parallèle avec la perspective de Cross (2005) sur le fait que le processus permet de définir un artéfact à produire. Ainsi, d'après notre compréhension et de par les exemplifications de méthodologies, un parallèle est possible entre le terme de méthodologie et celui de processus, bien que l'auteur ne définisse pas ce terme. Enfin, l'auteur fait une distinction entre méthodes et techniques en s'appuyant sur les définitions de Mish – point de vue qui était également partagé par Brinkkemper (1996). La méthode est alors définie comme « a systematic procedure, technique, or mode of inquiry employed by or proper to a particular discipline or art ». La définition de technique s'appuie sur celle de méthode en définissant une technique comme « a body of

technical methods (as in a craft or in scientific research) ». Sur la Figure 4.4, la technique est donnée comme une procédure étape par étape, alors que le terme de « procédure » semble initialement rattaché à la définition de la méthode. On comprend toutefois, de par la figure, que la technique est supposément plus appliquée.

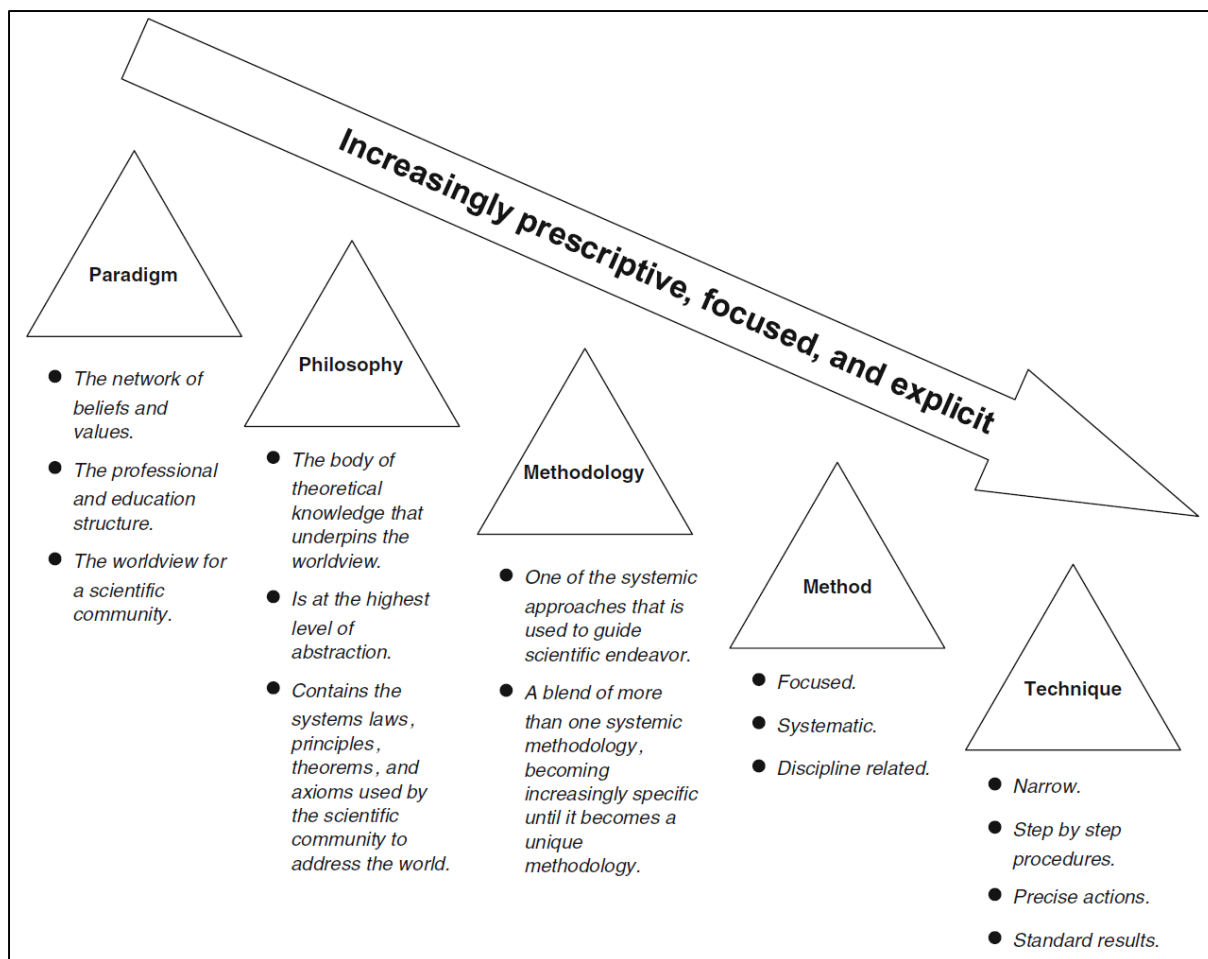


Figure 4.4 Relation entre les termes scientifiques
Tirée de Adams (2015)

Dans l'ensemble ce modèle introduit des concepts qui n'étaient pas encore discutés jusqu'à présent, tel que celui du paradigme, qui dans notre cas est circonscrit à celui de l'ingénierie ; ainsi que le concept de la philosophie, portant un ensemble de connaissances en ingénierie,

parfois spécifiques à une discipline. Cette notion de philosophie se place au-dessus de la méthodologie, des méthodes et techniques.

La section suivante revient sur ces modèles et justifie la création d'un nouveau modèle de structuration des concepts et techniques en quatre niveaux.

4.1.2 Proposition d'un modèle de structuration des concepts et techniques

Une majorité des modèles semblent avoir adopté un schéma en trois niveaux. Les niveaux les plus récurrents sont ceux de type processus-méthode-outil, hiérarchisés dans cet ordre (Albers *et al.*, 2014 ; Vajna, 2005 ; Estefan, 2008 ; Legendre, Lanusse et Rauzy, 2016). À noter que le cœur du modèle d'Estefan (2008) est réparti en trois niveaux, l'environnement étant davantage considéré comme un élément influenceur. Cet agencement hiérarchique entre processus et méthode était par ailleurs entrevu dans les définitions proposées par (Electronic Industries Alliance - EIA, 1999 ; Araujo Jr., 2001 ; Salminen et Verho, 1992 ; Cross, 2005 ; Wynn et Clarkson, 2005). Cet agencement hiérarchique semble alors faire consensus au sein de la littérature. Adams (2015) et Mann (2010), qui proposent d'autres modèles, ne semblent pas aller à l'encontre de cet agencement. Néanmoins, ces deux auteurs introduisent un niveau plus global, représentatif d'une façon de penser et portant l'idée d'un regroupement, qu'ils qualifient de « philosophie ». Cet aspect semble absent des modèles à trois niveaux de type processus-méthode-outil.

Au-delà de l'analyse des modèles existants, une réflexion à base de cas a également été utilisée pour confronter ces modèles à la réalité. Ainsi, le concept d'une philosophie nous semble important, si ce n'est indispensable, quand il s'agit de qualifier ce que sont Lean, ou encore Agile. En effet, la dénomination courante de « Méthodes Agile » nous apparaît comme un abus de langage, alors qu'Agile Manifesto contient 12 principes (Beck *et al.*, 2001); Lean, et plus précisément dans notre cas le développement de produits Lean – *Lean product development* (LPD) – agrège 13 principes (Liker et Morgan, 2006). Or, Agile et LPD ne sont ni des

processus (suites d'étapes au sens défini par Vajna (2005) ou décrit par Paetzold (2017)), ni des méthodes (au sens défini par Cross (2005)). Il y aurait donc un manque pour qualifier ces ensembles de principes de haut niveau si l'on se fie aux modèles en trois niveaux de type processus-méthode-outil. De notre point de vue, un niveau supplémentaire apporterait davantage de compréhension sur les différents principes qui unissent, homogénéisent et fédèrent les processus, méthodes et outils. Néanmoins, le modèle d'Adams (2015) ne peut être directement exploité comme système de classification pour nos travaux, ses définitions manquant parfois de clarté. En effet, la distinction entre « méthode » et « technique » aurait bénéficié d'une caractérisation plus précise, ainsi que de quelques exemples.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc opté pour un modèle en quatre niveaux. Ce niveau supplémentaire, qui se place au-dessus de processus, est dénommé **approche** au sein de nos travaux, structurant alors une hiérarchie en **approche, processus, méthode, outil**. Ainsi, nous défendons qu'un modèle en quatre niveaux est plus représentatif de la granularité des éléments recensés dans la littérature scientifique. Notre modèle s'établit sur ces observations, en reprenant la structure hiérarchique processus-méthode-outil, qui semble acceptée au sein de la littérature scientifique.

4.2 Le modèle APMO en quatre niveaux : structurer le développement et organiser la littérature

La section précédente a présenté le besoin de développer un modèle pour organiser la variété de concepts et techniques et le besoin d'un niveau supplémentaire qui mène à notre proposition d'un modèle en quatre niveaux, dénommé APMO. Ce modèle, présenté dans la section suivante, puis exemplifié par la suite, s'appuie sur les définitions proposées. Notre modèle est également mis en œuvre par un arbre de décision établi sur la base des caractéristiques contenues dans nos définitions. Cet arbre répond ainsi à notre besoin d'assurer un classement systématique des concepts et techniques.

4.2.1 Le modèle APMO en quatre niveaux : définitions

Afin de favoriser le transfert vers l'industrie de notre modèle, la structure organisationnelle et décisionnelle d'une entreprise est discutée puis liée à notre modèle. Ainsi, les différents niveaux décisionnels sont associés à nos niveaux de développement. Enfin, les niveaux décisionnels disposent d'une portée temporelle spécifique qui sera également considérée.

Une des structurations décisionnelles parfois rencontrées au sein de la littérature est celle en trois niveaux que sont stratégique, tactique – « administratif » est le terme initialement utilisé par Ansoff – et opérationnel. Cette structuration est décrite par Ansoff, également proposée par Le Moigne et parfois représentée par une pyramide décisionnelle, page 330 de Kéradec (2012). Ce découpage est adopté par Gutierrez et Serrano (2008) dans un contexte de transformation des systèmes d'information, et par Girard et Doumeingts (2004). Toutefois, ces derniers se distinguent par le lien entre ces niveaux décisionnels et la structure de développement (Girard et Doumeingts, 2004). Ces niveaux et leurs transpositions au développement de produits ont également été employés par différents auteurs (Bricogne, 2015 ; Merlo et Girard, 2004), et nous nous inscrivons dans une logique similaire. Au sein de leurs travaux, Girard et Doumeingts (2004) décrivent le rôle de chacun de ces niveaux pour plusieurs facettes relatives à l'ingénierie, tel que la gestion des connaissances des projets, la conception – comprendre « développement » dans le cadre de nos travaux – la planification, la gestion des exigences, des informations relatives au projet, ou encore des ressources.

Selon Girard et Doumeingts (2004), le **niveau stratégique** est en charge des décisions à long terme. Ce niveau est axé sur la définition d'un plan de développement pour chaque projet comportant, de manière non exhaustive, les objectifs de coût, de temps et les ressources allouées. Cela permet de soutenir la prise de décision pour le démarrage ou non des projets en regard du plan stratégique de l'entreprise. Le niveau stratégique cherche à valider la faisabilité du projet. Nous retiendrons principalement l'aspect macroscopique du plan de développement, et l'horizon temporel à long terme.

Le **niveau tactique** couvre les décisions à moyen terme. Pour la planification, ce niveau précise les objectifs de chaque projet ainsi que l'allocation des ressources. Pour le développement de produits, le niveau tactique définit le plan d'activités, ce qui s'inscrit, d'après nous, dans une logique de processus. Nous retiendrons la portée moyen-terme des décisions et la décomposition du plan établit au niveau stratégique.

Enfin, le **niveau opérationnel** concerne des décisions à court terme. Cela passe par la définition détaillée du plan d'activité de chaque projet ainsi que par la gestion de la progression de chacune des activités afin d'atteindre les objectifs. Le niveau opérationnel assure la réalisation des activités de conception (Girard and Doumeingts, 2004). Ce niveau traite ainsi de l'exécution effective du plan et de chacune de ces activités.

Ces trois différents niveaux, stratégiques, tactiques et opérationnels, constituent un modèle de structuration organisationnelle et décisionnelle des entreprises. Ces niveaux sont pris en considération et associés à chacun de nos quatre niveaux, qui sont définis de la manière suivante :

Approche : Une approche peut être perçue comme une philosophie. C'est un regroupement de principes permettant d'aborder le développement de produits de manière macroscopique. Son applicabilité dépend de la transposition de ces principes au sein des processus, méthodes et outils. L'approche se positionne au niveau stratégique de l'entreprise.

Processus : Un processus regroupe une série d'étapes mesoscopiques et organisées temporellement – de manière séquentielle ou concourante – et/ou logiquement pour répondre à une finalité. Cette suite d'étapes dispose d'éléments d'entrée (besoin client, cahier des charges, etc.), de ressources (financières, humaines, informatiques, etc.) en vue d'obtenir un résultat pouvant prendre la forme d'un produit tangible. Le processus peut être itératif et comporter des jalons (*milestones*). Le processus organise les étapes de développement d'un

produit et s'appuie sur des méthodes et outils pour l'opérationnalisation des étapes. Le processus se positionne au niveau tactique de l'entreprise.

Méthode : Démarche structurée se traduisant par un ensemble de règles et de pratiques d'ingénierie s'inscrivant dans un processus plus général permettant de réaliser une procédure technique en vue d'atteindre un résultat. Les tâches d'une méthode peuvent être réalisées à leur tour par des outils. Une méthode se positionne au niveau opérationnel.

Outil : Un outil permet de soutenir la réalisation d'une tâche délimitée en vue d'obtenir et/ou d'améliorer un résultat en agissant sur un élément en particulier. Un outil intervient dans un but défini à un moment circonscrit du développement du produit, pour soutenir une méthode ou un processus. On peut distinguer les outils d'édition qui ont pour but de créer/produire/améliorer un résultat et les outils de gestion qui doivent maintenir un résultat/un état. Notons qu'un outil peut être totalement ou partiellement automatisé. Enfin, l'outil se positionne au niveau opérationnel.

Comme l'exprime sa définition, l'**approche** n'est pas applicable en tant que telle, mais est appliquée par sa décomposition en processus, méthodes et outils. Une **approche**, à travers sa philosophie et ses principes, vient donc agglomérer une structure plus ou moins complète de processus, méthodes et outils. Ainsi, nos travaux sont motivés par l'identification de structures associées aux approches. En conséquence, en complément de la définition de chacun des quatre niveaux, un terme a été choisi afin de représenter l'agencement et la structuration des quatre niveaux. Ce terme est celui d'un « **ensemble** » – *set* en anglais. Un **ensemble** est défini comme une combinaison de concepts et de techniques de chaque niveau permettant d'appuyer le développement d'un produit. Le terme d'**ensemble** apporte une forme de structuration. Un **ensemble** est ainsi nécessairement composé *a minima* d'une approche, d'un processus, d'une méthode et d'un outil. L'**ensemble** porte le nom de l'approche. Par exemple, un **ensemble** Agile peut être composé de l'approche Agile, associé à un processus Scrum, appuyé par une

méthode d'intégration continue et d'outils comme les sprints, les *backlogs* ou encore les *user stories*.

Un **ensemble** est défini comme une combinaison composée *a minima* d'une approche, d'un processus, d'une méthode et d'un outil, afin d'appuyer le développement d'un produit.

Enfin, précision supplémentaire, nous détachons également le niveau de sa mise en œuvre. Cela est expliqué par Araujo Jr. (2001) à travers l'exemple de Quality Function Deployment (QFD), considéré par notre modèle comme une méthode. Sa mise en œuvre peut prendre la forme d'un journal papier, d'un livre ou encore d'un logiciel (Araujo Jr., 2001). Dans notre cas, la manière dont le concept ou la technique est appliqué, que cela soit sur papier, dans un fichier Excel, ou encore dans un logiciel spécialisé, n'affecte pas notre classification.

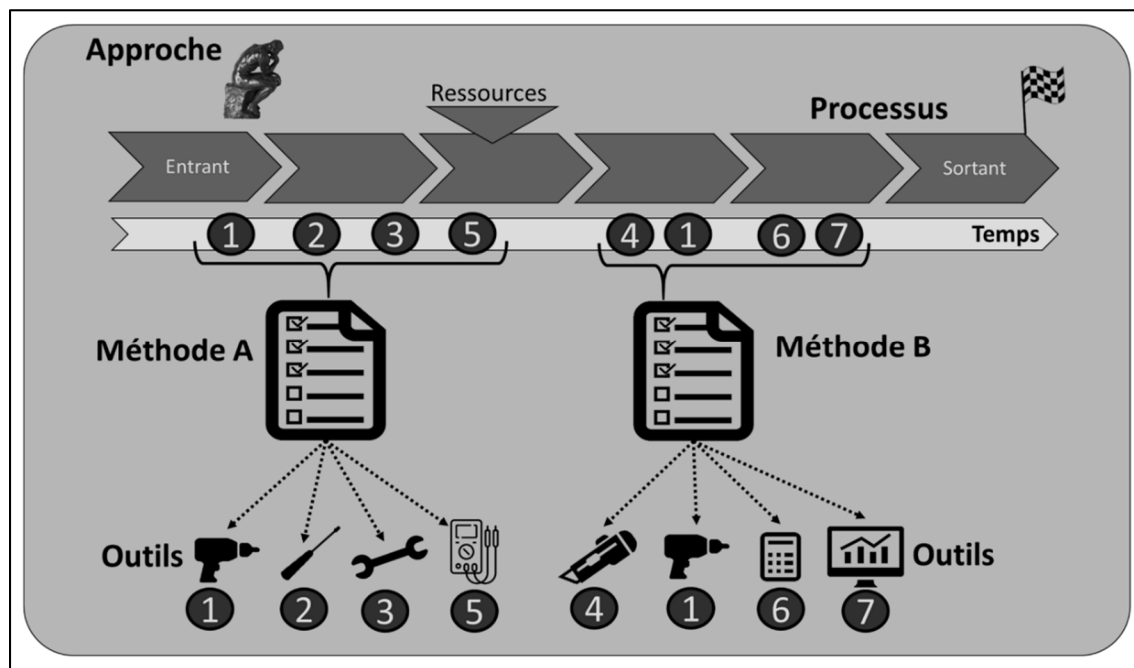


Figure 4.5 Modèle APMO en quatre niveaux pour la structuration du développement de produits : approche, processus, méthode et outil

La Figure 4.5 et la Figure 4.6 synthétisent à eux deux notre modèle APMO, dont le nom fait référence aux quatre niveaux que sont approche, processus, méthode et outil. La Figure 4.5 s'attarde sur l'agencement logique, qui est précisé par une vision plus hiérarchique sur la Figure 4.6. La Figure 4.6 précise également la portée temporelle de nos quatre niveaux, et les organise du plus appliqué – l'outil – au plus abstrait – l'approche ; et par conséquent, en lisant la pyramide de haut en bas, vers l'opérationnalisation.

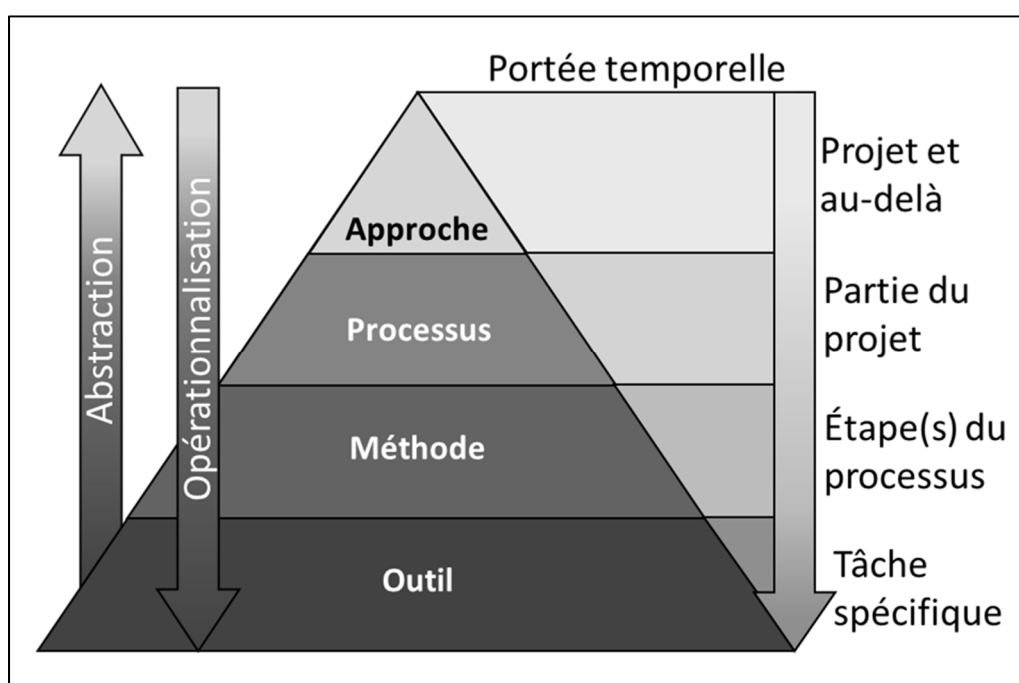


Figure 4.6 Pyramide hiérarchique ordonnant les quatre niveaux APMO par leur degré d'abstraction, d'opérationnalisation et par leur portée temporelle

La Figure 4.5 met davantage l'accent sur l'agencement logique. L'approche constitue alors le cadre global, la philosophie générale et englobante dans laquelle prennent place les processus, méthodes et outils. Le processus est représenté sous sa forme d'une série d'étapes comportant des entrants et sortants, ainsi que l'appui de ressources. À noter que cette forme séquentielle n'est qu'à titre de représentation graphique et d'autres processus, comme nous le verrons par la suite, adoptent des représentations différentes, en parallèle, ou cycliques. Les méthodes viennent alors soutenir certaines étapes du processus de développement de produits. Plusieurs

méthodes peuvent intervenir à chaque étape du processus, et être réemployées à différentes étapes. Enfin les outils peuvent également soutenir à leur tour une ou plusieurs méthodes ; ou encore dans certains cas, venir soutenir directement le processus dans la réalisation d'une tâche ponctuelle et circonscrite. En décrivant ce schéma, il peut être attendu une construction pyramidale entre approche, processus, méthodes et outils. Une approche faisant alors intervenir au minima un processus, soutenu par différentes méthodes, elles-mêmes soutenues par une variété encore plus importante d'outils. Cette vision hiérarchique et pyramidale est portée par la Figure 4.6.

Dans la suite du manuscrit, la terminologie de « **concepts et techniques** » fait désormais référence aux différentes **approches, processus, méthodes** et **outils** pouvant être employés dans le cadre d'un développement de produits. Le terme de « technique » fait ici référence aux méthodes et outils, manipulés par les praticiens du design et qui ont par conséquent une dimension axée sur la pratique. Cette dimension pratique est par ailleurs mise en avant dans la technique telle que définie par Blessing (1994) et citée par Araujo Jr. (2001). De ce fait, « concept » fait référence aux niveaux plus abstraits et conceptuels que sont les processus et les approches.

L'expression **concepts et techniques** fait référence aux différentes **approches, processus, méthodes** et **outils** pouvant être employés et organisés pour structurer un développement de produits.

4.2.2 Le modèle APMO en quatre niveaux : arbre de décision pour la classification

Sur la base des définitions précédemment établies et de leurs caractéristiques, un arbre de décision pour assurer une classification systématique a été construit, permettant ainsi un positionnement des différents concepts et techniques au sein du modèle APMO. L'arbre est construit sur un parcours séquentiel. Il débute au niveau le plus abstrait, l'approche, jusqu'au niveau le plus appliqué, l'outil. La présence de cas spécifiques est également intégrée à l'arbre

de décision. Cet arbre de décision est représenté par la Figure 4.7 sous la forme d'un logigramme.

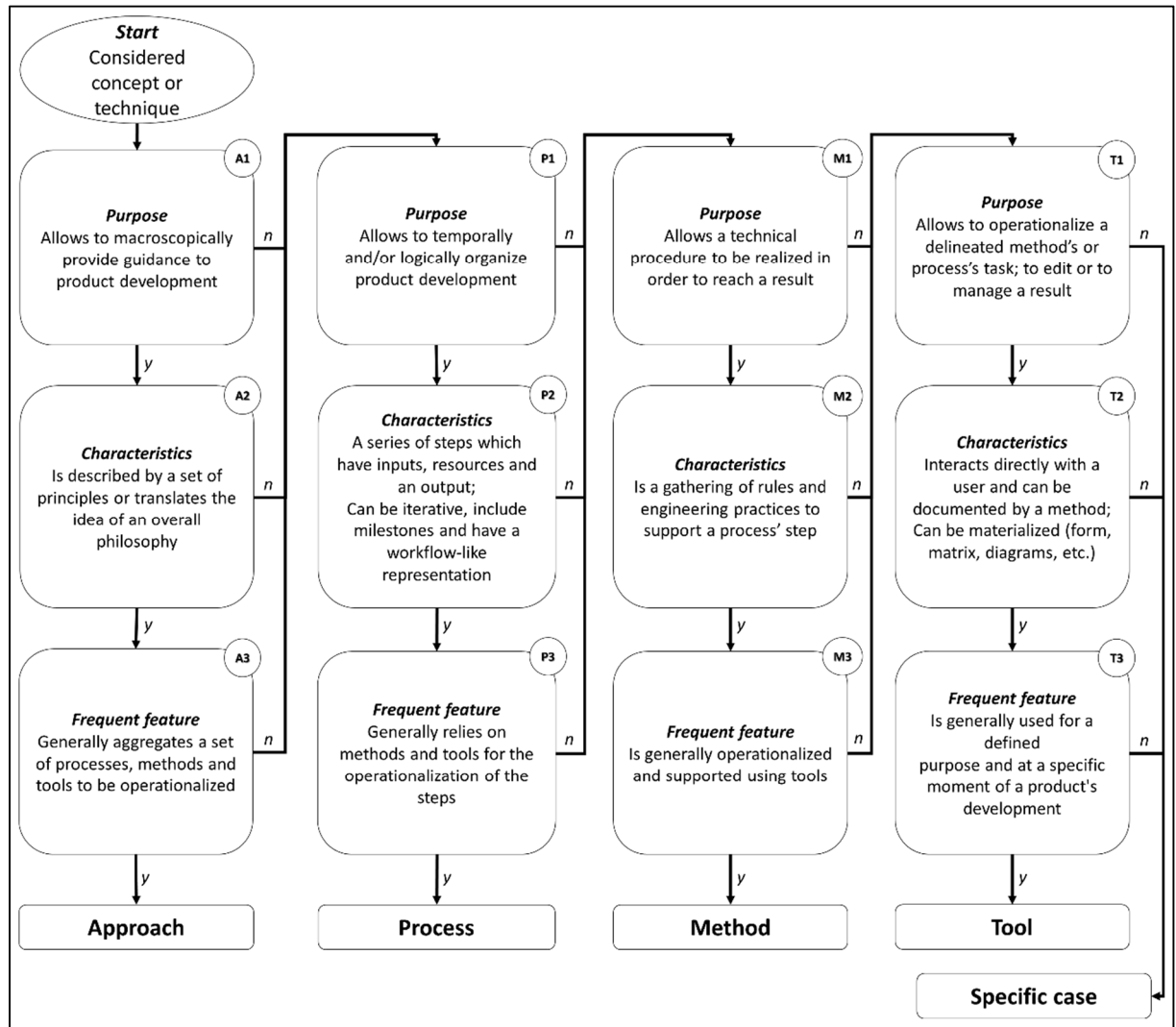


Figure 4.7 Arbre de décision pour la classification des concepts et techniques

La classification s'appuie sur une série de trois questions qui portent, en premier lieu sur leur finalité, puis leurs caractéristiques et enfin un trait généralement rencontré. Cette série de trois questions est répétée pour chacun des niveaux du modèle. En ce sens, la finalité porte sur ce qui est permis, ce qui résulte de l'utilisation du concept ou de la technique. La question portant

sur les caractéristiques interroge sur la nature intrinsèque du concept ou de la technique et la forme sous laquelle ils peuvent être généralement rencontrés. Enfin le trait commun est une caractéristique supplémentaire qui est généralement rencontrée, mais qui n'est pas obligatoire. Cette troisième question sert généralement de confirmation.

Dans l'usage, un minimum d'une définition ou d'une courte présentation de l'utilisation des concepts et techniques est requis en vue de pouvoir parcourir l'arbre de décision. Néanmoins, au sein de la littérature scientifique, plusieurs définitions peuvent coexister et dans certains cas orienter différemment la classification des concepts et techniques. Dans ce cas-ci, trois options ont été mises en œuvre dans l'ordre de priorité suivant.

La première option consiste à retrouver et s'appuyer sur la définition considérée comme originelle dans la littérature scientifique. Un exemple pourrait être l'*Axiomatic Design* qui a été fondé et initialement défini par Suh (1998). En effet, c'est à cet auteur que les chercheurs qui s'inscrivent dans la continuité de ses travaux se réfèrent. Un autre exemple pourrait être le Manifeste Agile comme référence aux 12 principes (Beck *et al.*, 2001) appuyé par de nombreux auteurs. C'est cette définition qui peut être considérée comme faisant foi. Cependant il peut parfois être difficile de retrouver cette définition originelle.

Lorsque la définition considérée comme originelle ne peut être retrouvée, la deuxième option est alors d'analyser la définition référencée par les auteurs. C'est par exemple le cas du *Design-driven development* mentionné par Goevert et Lindemann (2018), pour lequel nous sommes basés exclusivement sur la définition fournie par les auteurs, et qui ne permettait pas de l'attribuer précisément à un niveau spécifique. Il peut en effet s'avérer pour les deux premières options que la définition référencée ne permet pas toujours de déterminer précisément à quel niveau un concept ou une technique appartient, un choix est alors indiqué et expliqué à la vue des caractéristiques dont nous disposons. Enfin, plusieurs auteurs peuvent décrire/définir un concept ou une technique de plusieurs manières différentes qui conduisent à un classement différent, ce qui nous amène à considérer une troisième option.

La troisième et dernière option vise alors à proposer une vision qui se veut fédératrice en représentant les différents classements possibles qui existent, appuyés par les références appropriées. À titre d'exemple, le *design thinking*, discuté au chapitre 5, peut, en fonction des cas, être considéré comme une méthode ou un processus. L'élément différenciateur tient en général à l'aspect temporel. Dans le cas où le *design thinking* appuie l'intégralité du développement de produits, selon une suite d'étapes, pouvant comporter des itérations et étant appuyé par des méthodes de créativité et d'idéation, ce dernier se rapproche des caractéristiques du processus (Goevert et Lindemann, 2018 ; Thoring et Müller, 2011). À l'inverse, dans le cas où le *design thinking* n'est employé que lors des phases amont du développement, notamment la phase d'idéation, en se basant sur des pratiques d'ingénierie, ce dernier tendra alors de se rapprocher d'un usage de type « méthode » (Luedeke *et al.*, 2018). Les deux cas d'application existant au sein du développement de produits multidisciplinaires, il a été choisi de représenter le *design thinking* à la fois comme un processus et une méthode. Par la suite, et notamment pour le chapitre 5, pour chacun des cas spécifiques, l'option adoptée parmi les trois présentées ci-dessus est explicitée.

Sur la base de la Figure 4.7, la Figure 4.8 propose une exemplification de l'usage de l'arbre de décision appliqué à quatre concepts et techniques que sont Agile, SCRUM, intégration continue – *continuous integration* –, et le *backlog*. Ainsi, pour l'Agile, les questions successives de l'arbre de décision sont traitées sur la base des éléments contenus dans le Manifeste Agile (Beck *et al.*, 2001). À noter que nous sommes toutefois conscients qu'Agile dispose d'une origine manufacturière (Sanchez et Nagi, 2001 ; Nagel et Dove, 1991), mais c'est ici la vision concrétisée autour du logiciel et du développement qui est discutée. L'arbre de décision débute avec la question de la case A1, question à laquelle Agile répond positivement, du fait qu'Agile peut être perçue comme étant de haut niveau et en lien avec le développement de produits logiciels. La réponse affirmative à la case A2 est motivée par l'ensemble des 12 principes du Manifeste Agile – qui ne sont pas des principes techniques – ainsi que par la philosophie sous-jacente qui peut leur être rattachée. Enfin sur la question d'une caractéristique fréquente portée par les approches, Agile peut être appuyée par

l'existence de SCRUM, Extreme Programming (XP), Adaptative Software Development (ASD), Crystal et Pragmatic Programming (PP) ou encore d'autres concepts et techniques venant opérationnaliser Agile (Goevert et Lindemann, 2018 ; Abrahamsson *et al.*, 2003). Par ailleurs, il est à noter que les principes d'Agile ont été formulés *a posteriori* et semblent alors émerger de ces concepts et techniques Agile énoncés (Abrahamsson *et al.*, 2003). En ce sens, Agile est une approche qui semble avoir émergé de la proposition de plusieurs concepts et techniques, ralliés par une philosophie commune.

Pour SCRUM, sur la base des informations fournies par Schwaber (1997), la réponse à la question de la case A1 pourrait être positive, toutefois la réponse à celle de la case A2 est négative. SCRUM ne rassemble pas un ensemble de principes et n'est pas non plus considéré comme une philosophie en tant que telle – au même sens que celui décrit précédemment pour Agile. Cependant, SCRUM organise le développement en suivant une série d'étapes menant à la réalisation d'un produit en sortie, validant de ce fait les cases P1 et P2. Pour la case P3, l'auteur mentionne s'appuyer sur des « techniques orientées objet ». Par conséquent, SCRUM est catégorisé comme un processus dans le cadre de nos travaux et non comme une « méthode Agile » tel que parfois rencontré dans la littérature.

L'intégration continue (Duvall, Matyas et Glover, 2007 ; Meyer, 2014) ne permet pas de gérer l'intégralité du développement de produits de manière macroscopique ; la réponse à la case A1 est donc négative. Pour la même raison, la réponse à la question P1 est négative. En effet, notre définition du développement de produits inclut les phases de *conceptual design*, *embodiment design* et *detailed design*, qui ne sont pas couvertes par l'intégration continue. De plus, pour les utilisateurs qui auraient considéré la réponse P1 comme affirmative, la réponse à la question P2 s'avère négative. L'intégration continue permet alors la réalisation d'une procédure technique permettant l'atteinte d'un résultat, elle peut être perçue comme une pratique d'ingénierie logicielle, pouvant s'inscrire dans un processus de développement logiciel, répondant de ce fait aux questions M1 et M2. Pour la question M3, il existe en effet des outils informatiques permettant de soutenir l'intégration continue, mais à notre connaissance, aucun

outil de développement de produits au sens auquel nous l'entendons. Cependant, M3 est une caractéristique fréquente, mais non obligatoire. Ainsi, selon notre compréhension, l'intégration continue est une méthode empruntée au développement informatique, qui peut également être considérée comme prenant place au sein de l'approche Agile (Stolberg, 2009).

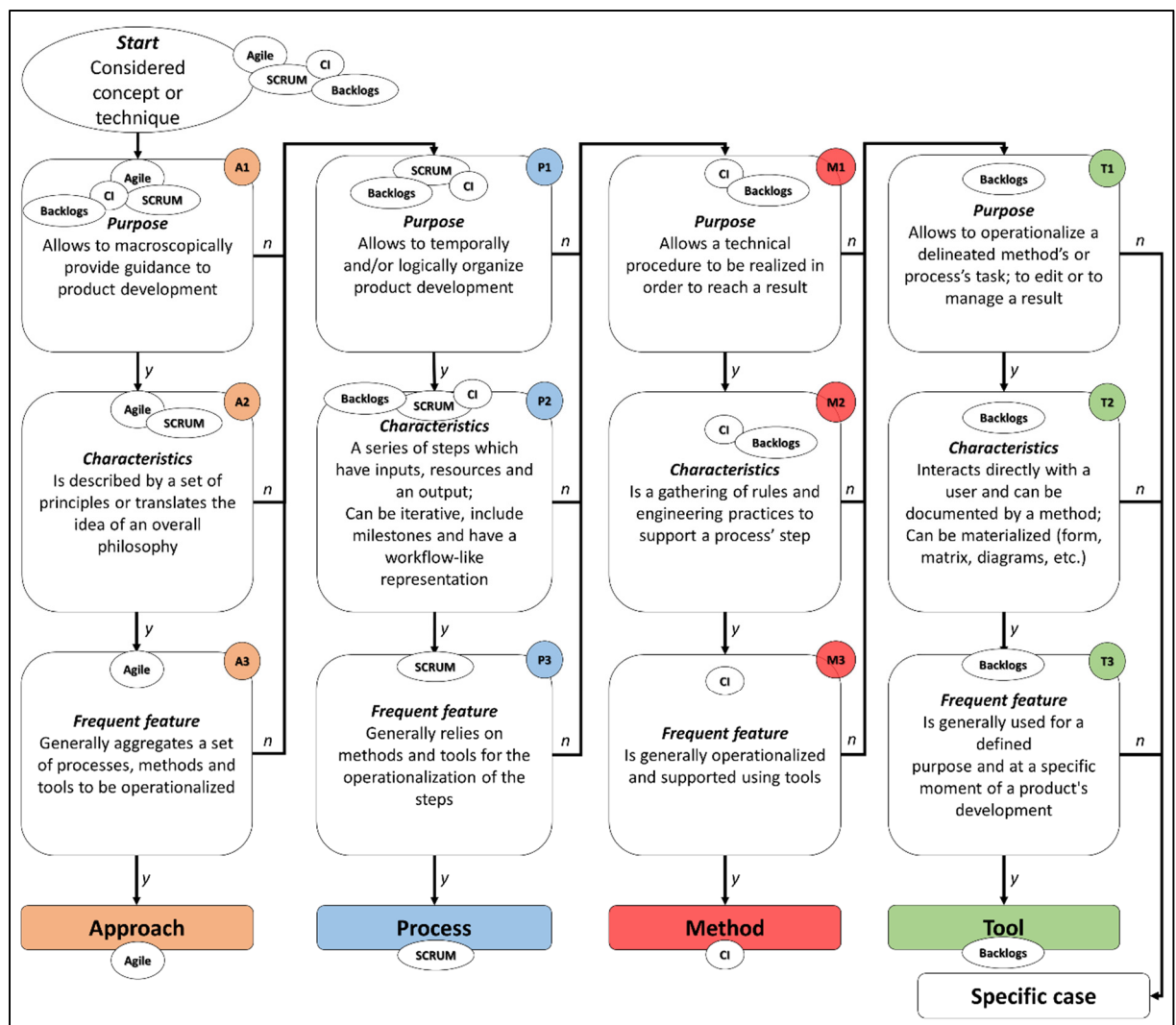


Figure 4.8 Application de l'arbre de décision au classement de concepts et techniques de l'ensemble Agile

Enfin, le *backlog* a pour vocation de structurer les *sprints* réalisés lors du processus SCRUM. Le *backlog* se positionne alors hiérarchiquement plus bas que SCRUM. Il ne permet donc pas

d'aborder l'intégralité du développement de produits, répondant alors négativement à la question de la case A1. Certains pourraient répondre positivement à la question P1 du fait que le *backlog* aspire à soutenir l'organisation des *sprints*, cependant il ne correspond pas à une série d'étapes. Idem, pour la case M1, certaines personnes pourraient y voir une procédure technique, cependant le *backlog* n'est pas un ensemble de règles ou de pratiques d'ingénierie, répondant de ce fait négativement aux cases M1 et M2. Le *backlog* vient établir la liste de tâches à effectuer pendant le *sprint*, de ce fait venant opérationnaliser une partie de la tâche du processus, validant la case T1. Le *backlog* est également directement construit par l'équipe de développement en fonction de ce qui est attendu à la fin du *sprint* et de ce qui est désiré par les clients et utilisateurs. Cette liste peut également se matérialiser sous la forme d'un tableau par exemple, validant de ce fait la case T2. Enfin, le *backlog* est utilisé pour effectuer une tâche précise, dans un but précis à un instant donné du développement de produits, venant de ce fait valider la case T3. Ainsi, le *backlog* est considéré comme un outil, appartenant également à l'approche Agile (Cooper et Sommer, 2016).

Comme évoqué durant l'exemplification, SCRUM, intégration continue, et *backlog* appartiennent à l'approche Agile. En ce sens, cette composition peut être considérée comme un **ensemble** Agile possible pour accompagner le développement de produits. L'approche Agile, issue de ces 12 principes, peut alors être opérationnalisée à travers l'usage d'un processus de type SCRUM, dont certaines étapes peuvent être soutenues par l'intégration continue et où certaines tâches du processus SCRUM peuvent être réalisées par le *backlog*, un outil.

4.3 Synthèse : notre modèle APMO en quatre niveaux

La contribution de ce chapitre est résumée sur la Figure 4.9. Ce chapitre a permis d'introduire notre modèle APMO dont les trois éléments constitutifs sont illustrés dans les bulles au sein du cadre gris à contour pointillé, illustrant le cœur de ce chapitre. Ce modèle s'inscrit dans un

besoin de structuration des concepts et techniques – bandeau noir – afin d’organiser le développement.

Le modèle APMO s’appuie sur une définition pour chacun des quatre niveaux. Ces définitions servent également de base à l’arbre de décision. Ce dernier nous permet de classer **systématiquement** la variété existante de concepts et techniques. Ces concepts et techniques classés seront par la suite organisés et représentés de manière graphique afin de former des « **cartographies** ». Ces dernières seront en effet créées pour représenter et analyser la littérature scientifique et la manière dont les entreprises développent leurs produits, rendant ainsi possible l’identification visuelle de structures de développement. Notre modèle en quatre niveaux établit donc une base commune permettant d’envisager **une comparaison** entre ces cartographies.

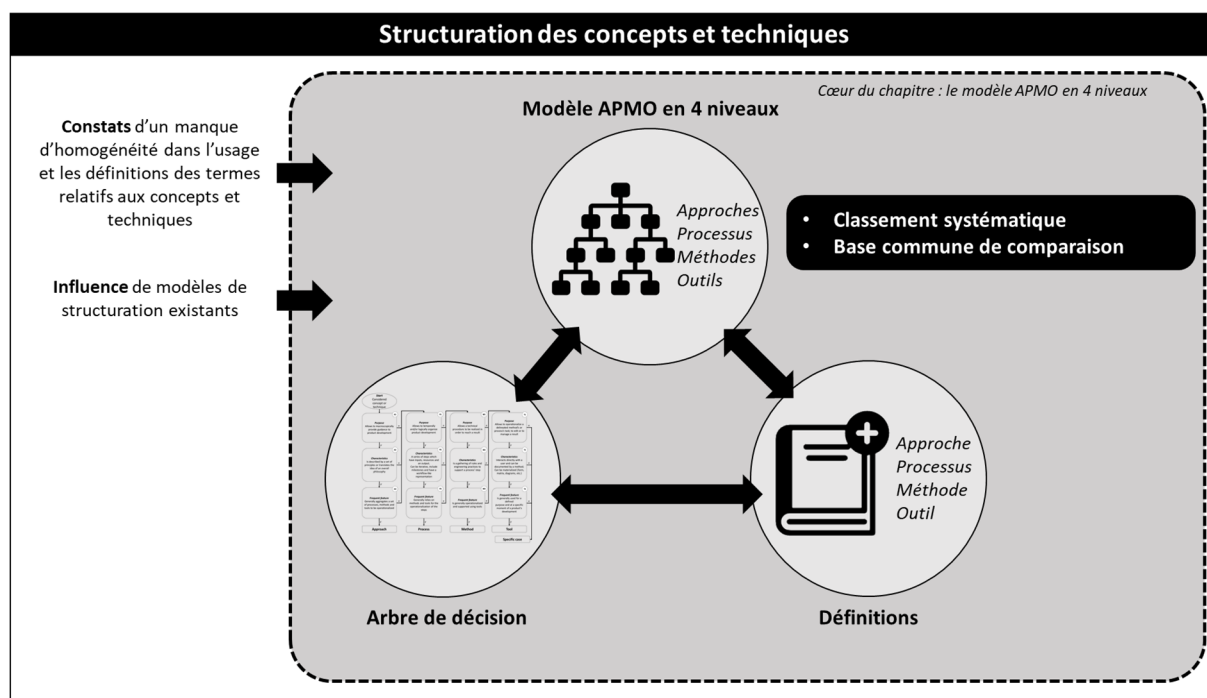


Figure 4.9 Synthèse du chapitre 4 : un modèle en quatre niveaux, appuyé par des définitions et un arbre de décision

Les chapitres 5 et 6 exploitent ce modèle en quatre niveaux et l'arbre de décision afin d'établir ces **cartographies** de la littérature scientifique et des pratiques industrielles.

CHAPITRE 5

CARTOGRAPHIE EN QUATRE NIVEAUX DU DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES

Le chapitre précédent a introduit notre première contribution qu'est le modèle APMO en quatre niveaux : approche, processus, méthode et outil. Ce modèle et l'arbre de décision associé sont employés au cours de ce chapitre afin de structurer et de représenter graphiquement le développement de produits multidisciplinaires tel qu'abordé au sein de la littérature scientifique. Ainsi, l'objectif de ce chapitre réside en l'élaboration de cartographies représentatives des concepts et techniques référencés dans la littérature scientifique pour appuyer le développement de produits mécatroniques, de SCP et de produits « intelligents ». Cela nous permet de répondre au premier objectif spécifique **de cartographie de la littérature scientifique**.

Le chapitre débute par une présentation des aspects méthodologiques relatifs à la revue de littérature menée, suivie de la légende de nos cartographies et d'une exemplification de leur construction. Les sections 5.2, 5.3 et 5.4 présentent et analysent les cartographies relatives au développement de produits mécatronique, des SCP, et aux produits intelligents. La section 5.5 propose une analyse plus globale permettant d'étayer les conclusions relatives aux cartographies considérées individuellement et de les comparer entre elles. La section 5.6 propose une cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaire en s'appuyant sur les trois cartographies précédentes. La section 5.7 conclut ce chapitre.

Ce chapitre a fait l'objet d'une publication soumise dans le journal *Research in Engineering Design*. Seuls les éléments les plus marquants sont discutés ici.

5.1 Méthodologie pour la revue de littérature

En vue de déterminer les concepts et techniques recommandés par la littérature scientifique pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires, une revue de littérature a été conduite. Cette revue de littérature porte sur le développement des trois types de produits multidisciplinaires identifiés que sont la mécatronique, les SCP et les produits intelligents. Elle s'appuie sur une collecte de données dont la méthodologie est détaillée à la section 5.1.1. Les différents concepts et techniques recueillis ont ensuite été classés sur la base de l'arbre de décision. De même, les liens entre les concepts et techniques ont également été extraits, en vue de constituer les cartographies, dont la légende est introduite à la section 5.1.2.

5.1.1 Collecte des concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires

Afin de collecter les concepts et techniques relatifs au développement des produits mécatroniques, intelligents et des SCP, les bases de données requêtées, les mots clés et les éléments écartés ont dû être définis. Le périmètre de nos travaux n'inclut pas les outils informatiques tels que la conception assistée par ordinateur, la gestion des données techniques, des données de simulation, des changements, des configurations, l'environnement de développement intégré, ou encore les outils de simulation (0D/1D ou 3D) qui peuvent être utilisés tout au long du processus de développement. Ces outils informatiques sont considérés comme agnostiques à l'approche, au processus, à la méthode et à l'outil déployés.

Pour répondre aux différentes orthographes et combinaisons de mots, les requêtes suivantes ont été formulées :

« "Mechatronic* product*" OR "Mechatronic* system*" »;
 « "Cyber physical system*" OR "Cyber-physical system*" »;
 « "Smart product*" OR "Smart system*" ».

Le terme « système » a ainsi été intégré à nos requêtes, car dans nos travaux le terme « produit » couvre les termes « produit » et « système ». De plus, chaque requête a été complétée par « “development” OR “design” », la conception – *design* – étant une partie du développement (Roozenburg et Eekels, 1995 ; Ulrich et Eppinger, 2016 ; Vajna *et al.*, 2005). Par ailleurs, certains auteurs ne réalisant pas nécessairement une distinction entre développement et conception, les deux termes ont été intégrés, afin de couvrir la variabilité des termes employés. Les requêtes ont été soumises dans les bases de données que sont *Scopus*²¹ et *Web of Science*²². Le cœur des articles devant être lié au développement de produits, les requêtes ont été limitées au titre. De plus, les requêtes ont également été limitées aux articles de revues. L'ANNEXE II présente la liste des requêtes soumises à l'été 2019.

Les résultats des deux bases de données ont été fusionnés afin de supprimer les doublons et composer une liste initiale de 304 articles – 161 sur la mécatronique, 105 sur les SCP et 38 sur les produits intelligents. Cette liste initiale a été filtrée pour établir une liste d'articles pertinents réduite à 167 articles. Pour être considéré comme pertinent, l'article doit nécessairement porter sur le développement – ou la conception – et intégrer des considérations de concepts et de techniques.

Enfin, en complément de la liste établie à partir des bases de données, un *backward snowballing* a été réalisé. Ce dernier a aidé à compléter le corpus existant avec des références supplémentaires (Wohlin, 2014 ; Jalali et Wohlin, 2012). La liste d'articles ainsi obtenue a permis d'extraire un ensemble de concepts et de techniques pour chaque type de produit. Les concepts et techniques ont par la suite été classés selon l'arbre de décision présenté dans le chapitre précédent.

²¹ <https://www.scopus.com/>

²² <https://webofknowledge.com/>

5.1.2 Modèle en quatre niveaux : légende pour la cartographie

Des cartographies, une par type de produit, ont été réalisées afin d'organiser la variété de concepts et techniques proposés par la littérature pour accompagner le développement de produits multidisciplinaires. Pour améliorer la clarté de la représentation et permettre de mieux appréhender les structurations de concepts et techniques, les cartographies sont composées de cinq figures pour le développement mécatronique, et de deux figures pour le développement SCP et des produits intelligents. Elles reposent sur le modèle APMO introduit au chapitre précédent, et organisent les concepts et techniques suivant les quatre niveaux, ainsi que les liens traduisant les associations de concepts et techniques. L'identification des liens repose sur une étude de chacun des articles afin de déterminer si les auteurs expriment formellement une association, ou si nous comprenons que les auteurs entendent une association. Ces deux niveaux de compréhension sont retranscrits dans la légende des cartographies, représentée par la Figure 5.1. En parcourant cette dernière de haut en bas, il est possible de distinguer trois éléments, que sont les blocs, les lignes et les références.

Le premier type de bloc à bordure continue représente un concept ou technique expressément cité par la littérature scientifique pour le développement de produits multidisciplinaires. Le deuxième bloc porte un sens similaire au premier bloc, mais signale que le concept ou technique est répété sur différentes figures pour un même type de produit. Ce deuxième type de bloc se distingue du premier par sa police en gris, en gras et italique. Enfin, le bloc à bordure pointillée indique un concept ou une technique que nous avons ajouté afin d'améliorer la compréhension générale de la cartographie, mais qui n'est pas expressément mentionné pour le développement de produits multidisciplinaires. Cet ajout est réalisé dans le cas d'hybridations, d'un concept ou technique dérivé, ou encore afin d'identifier une approche dont seuls les processus, méthodes et outils sont mentionnés. Pour rappel, une hybridation résulte d'une combinaison de deux (ou plus) concepts et techniques dont la valeur résultante attendue est plus élevée que s'ils étaient utilisés séparément (Guérineau *et al.*, 2016). Par exemple, le processus Agile Stage-gate résulte de la combinaison d'Agile et Étape-jalon – *Stage-gate*

(Goevert et Lindemann, 2018). Une dérivation est une spécialisation d'un concept ou d'une technique à des fins spécifiques. Un exemple possible est le cycle en W qui dérive du cycle en V (Nattermann et Anderl, 2010).

Pour les lignes, une ligne continue signifie que les deux concepts et techniques ont été expressément cités et liés ensemble, et sont donc appuyés par une référence. La ligne interrompue représente quant à elle un lien créé selon notre compréhension de la référence indiquée, mais où l'association entre des concepts et des techniques n'était pas explicite. La flèche en trait mixte indique des hybridations et dérivations. Une dérivation est indiquée par une flèche en trait mixte unique qui pointe vers un concept ou une technique dérivé. Deux flèches en trait mixte convergent vers une hybridation, et les origines des flèches sont les concepts ou techniques hybridés. Enfin, la séparation entre les différents niveaux est marquée par les trames grises.

Une référence peut être associée à un bloc, ou apparaître le long d'une ligne. Les références d'un concept ou d'une technique expressément cité sont en noir. Dans le cas où plusieurs références cohabitent sur une ligne continue, un astérisque placé à côté d'une référence indique que le lien est interprété selon notre lecture et équivaut alors à une ligne interrompue pour cette référence. Enfin, les références mentionnées pour améliorer la cartographie, mais qui ne concernent pas le développement de produits multidisciplinaires, sont en caractères gris clair.

Enfin, le rectangle coloré sur le côté droit des blocs permet d'identifier visuellement l'appartenance à une approche des concepts et techniques les opérationnalisant. Chaque approche possède sa propre couleur, qui à son tour aide à identifier les **ensembles** possibles. Les différentes couleurs et approches associées sont regroupées au bas de la Figure 5.1.

Nota Bene : Nous suggérons d'imprimer cette légende et ce code couleur sur une feuille à part afin de pouvoir interpréter les cartographies qui sont présentées ci-après. La section suivante détaille leur construction.

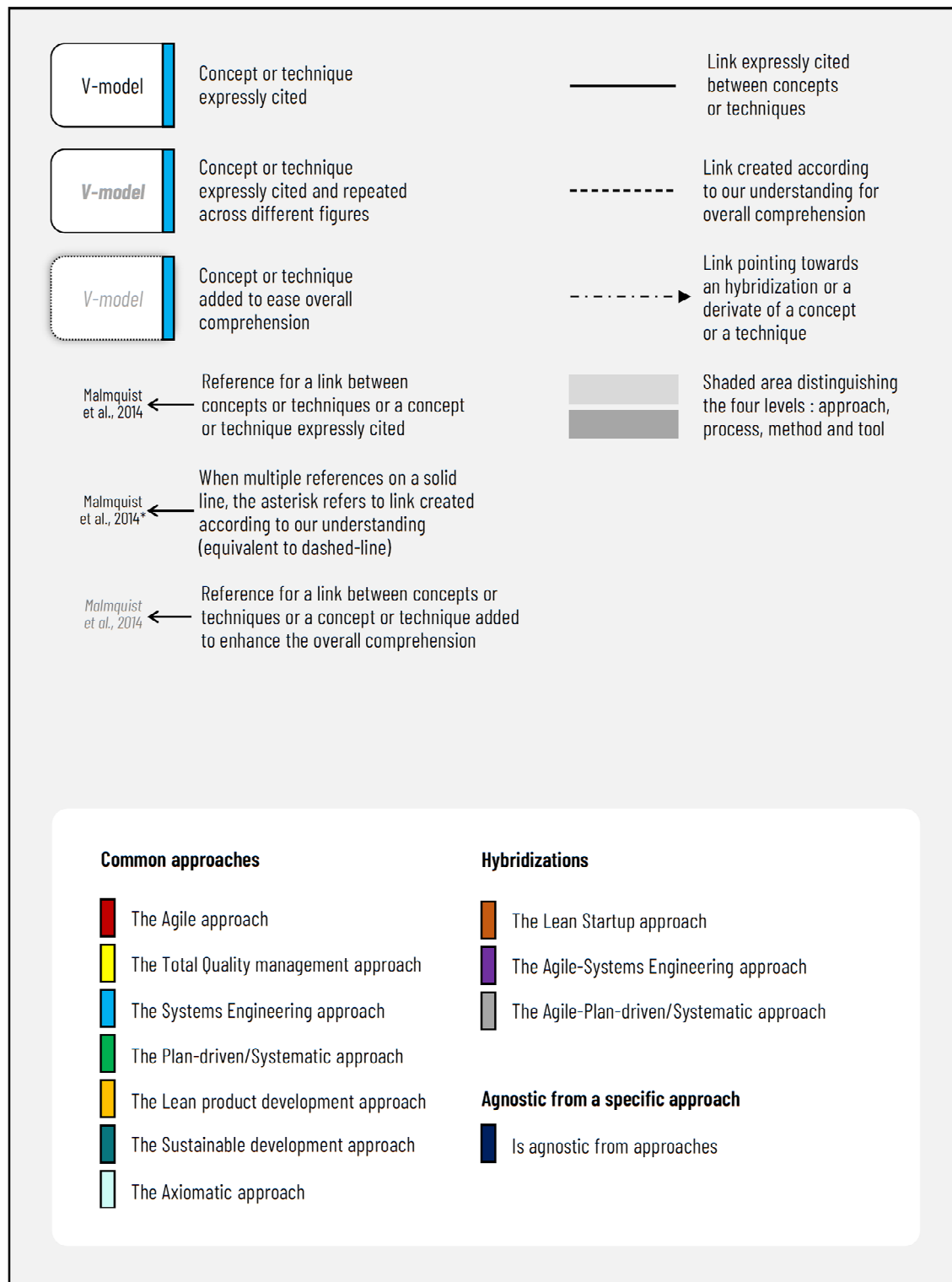


Figure 5.1 Légende des cartographies de la littérature scientifique et code couleur pour l'identification des approches et les concepts et techniques associés

5.1.3 Exemple de construction étape par étape d'une cartographie

Les cartographies établies restent relativement complexes. Afin de mieux appréhender la rigueur employée pour leur construction, deux éléments sont proposés. Tout d'abord, les ANNEXE III, ANNEXE IV et ANNEXE V regroupent respectivement l'analyse de la littérature relative au développement de produits mécatroniques, SCP et des produits intelligents. Les annexes détaillent ainsi en profondeur les différents blocs et liens représentés au sein des cartographies. Le second élément, présenté dans cette section, correspond à un exemple illustrant la façon dont la cartographie relative à l'approche « Ingénierie Système - IS » a été élaborée à partir des éléments contenus dans l'ANNEXE III et dont l'essentiel des éléments est rappelé ci-après. L'exemplification, illustrée par la Figure 5.2, détaille étape par étape la transposition de l'énumération textuelle des concepts et techniques contenus dans la littérature retenue vers une cartographie.

Étape 1.

En lien avec le développement mécatronique, plusieurs chercheurs proposent le recours à l'IS, considérée comme une approche selon l'arbre de décision. Cependant, parmi les diverses références discutées dans la section, seules deux références mentionnent l'IS sans établir de lien avec d'autres concepts ou techniques (Sünnetcioglu *et al.*, 2016 ; Turki, Soriano et Sghaier, 2005). Ces deux références sont associées au bloc dessiné en trait continu, car explicitement cité pour le développement mécatronique. Le rectangle droit est coloré en bleu clair qui représente l'approche IS en accord avec le code couleur établi par approche, tel qu'indiqué sur le bas de la Figure 5.1. Cette première étape est illustrée par l'étape 1, Figure 5.2.

Étape 2.

L'étape 2 positionne le cycle en V dont l'utilisation est discutée pour le développement de produits mécatroniques. L'arbre de décision a permis de déterminer que le cycle V est un processus. De même que pour l'étape 1, parmi les diverses références discutées, une seule traite

du cycle en V de manière isolée (Malmquist, Frede et Wikander, 2014). La référence est associée au bloc, également dessiné en trait continu. Bien que le cycle en V soit initialement un processus de génie logiciel (Graessler et Hentze, 2020), ses adaptations telles que présentées par les différents auteurs tendent à appartenir à l'approche IS (INCOSE, 2015). Par conséquent, la couleur rectangle à droite correspond à l'approche IS. Ceci est illustré par l'étape 2, Figure 5.2.

Étape 3.

Des chercheurs ont proposé d'employer conjointement l'IS et le cycle en V. En conséquence, une ligne continue est tracée entre l'IS et le cycle en V, et les références faisant mention de cette association sont positionnées le long de la ligne. Forsberg et Mooz (1991) est l'une d'entre elles, mais les auteurs n'abordent pas explicitement la mécatronique et sont positionnés de manière à enrichir la cartographie. Par conséquent, cette référence est en caractères gris clair, comme indiqué sur la légende, Figure 5.1. Ceci est représenté par l'étape 3, Figure 5.2.

Étape 4.

L'étape 4 illustre la dérivation d'un concept ou d'une technique. Une dérivation est représentée par une flèche en trait mixte attachée au concept ou à la technique d'origine et pointant vers sa dérivation. Dans ce cas, partageant des caractéristiques similaires, le cycle en W proposé par (Nattermann et Anderl, 2010) dérive du cycle en V du VDI2206. Comme le cycle en W est introduit pour l'adaptronique et non pour la mécatronique – malgré le fait qu'ils soient proches – la référence est en caractères gris clair. Toutefois, Barbieri, Fantuzzi et Borsari (2014) citent expressément l'usage du cycle en W pour la mécatronique. Cette référence sera donc associée au bloc. Ceci est représenté par l'étape 4, Figure 5.2.

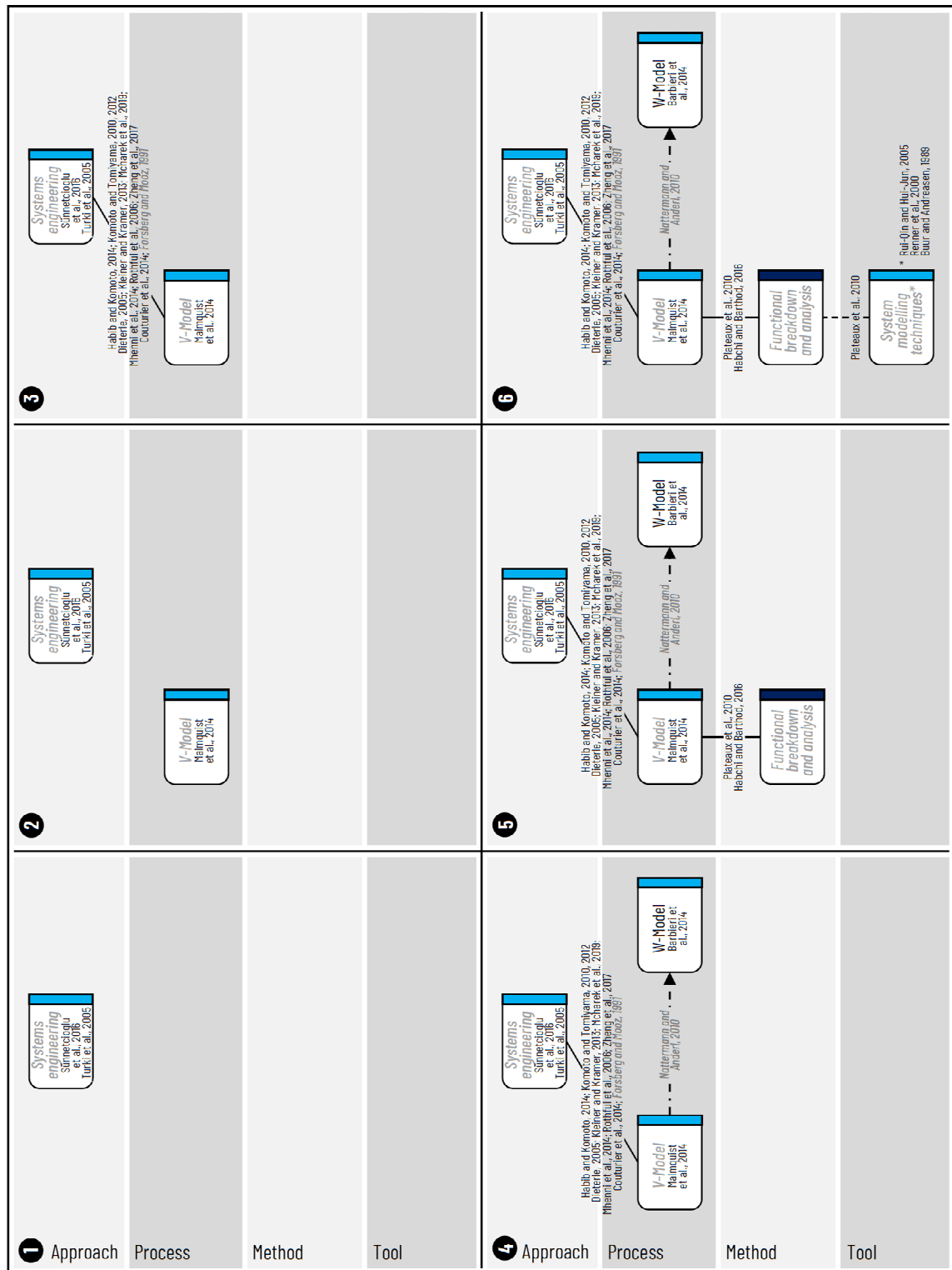


Figure 5.2 Illustration étape par étape de la construction de la cartographie relative à l'Ingénierie Système et au cycle en V

Étape 5.

L'étape 5 illustre l'ajout du bloc « décomposition et analyse fonctionnelle », classé comme une méthode et proposé par deux références (Habchi et Barthod, 2016 ; Plateaux *et al.*, 2010). De plus, ces deux références utilisent expressément la décomposition et l'analyse fonctionnelle pour soutenir le côté descendant du cycle en V, ce qui se traduit par une ligne continue entre ces deux blocs. Toutefois, la décomposition et l'analyse fonctionnelle sont ancrées dans le génie mécanique (Plateaux *et al.*, 2010) mais ne sont pas, selon notre compréhension, réadaptées aux contraintes de l'IS. Par conséquent, la décomposition et l'analyse fonctionnelle sont considérées ici comme agnostique des autres approches. Le rectangle droit est donc coloré en bleu foncé, comme indiqué dans la Figure 5.1.

Étape 6.

Enfin, l'étape 6 ajoute les techniques de modélisation système – *system modelling techniques* –, classées comme des outils. Ce bloc regroupe les contributions qui traitent de diverses tâches de modélisation et les travaux s'appuyant expressément sur UML, SysML ou d'autres langages et représentations symboliques. Certains auteurs abordent exclusivement les techniques de modélisation système sans les lier à d'autres concepts ou techniques. En conséquence, des références sont associées à ce bloc (Buur et Myrup Andreassen, 1989 ; Renner *et al.*, 2000 ; Rui-Qin et Hui-Jun, 2005). De plus, Plateaux *et al.* (2010) discutent de l'utilisation des techniques de modélisation système en lien avec la décomposition et l'analyse fonctionnelle. Toutefois, ce lien n'est pas expressément indiqué, mais interprété à travers la lecture de l'article. Par conséquent, le lien est une ligne interrompue avec la référence associée, ici « Plateaux *et al.* (2010) ».

5.2 Cartographie et synthèse du développement de produits mécatroniques

Premier des trois types de produits qui seront abordés, la mécatronique nécessite de par sa complexité l'adoption de nouveaux concepts et techniques pour soutenir son développement (Lapusan *et al.*, 2010 ; Mhenni *et al.*, 2014). Cette section propose de les organiser au sein

d'une cartographie. Du fait de la diversité et du grand nombre de concepts et techniques, la cartographie du développement mécatronique est représentée sur cinq figures différentes (Figure 5.3 à Figure 5.7). Ainsi, la Figure 5.3 représente l'**ensemble** IS et les **concepts et techniques** qui peuvent y être rattachés. La Figure 5.4 se concentre principalement sur la conception systématique et Agile. Les Figure 5.5 et Figure 5.6 rassemblent divers concepts et techniques et blocs isolés, et la Figure 5.7 rassemble les travaux sur l'hybridation entre Agile et l'IS.

Tout d'abord, on peut observer que le développement de produits mécatroniques englobe une grande variété d'approches avec l'éco-conception, le management de la qualité totale – *total quality management* (TQM) –, l'IS, la conception axiomatique, Agile et certaines de leurs hybridations comme *Agile Systems Engineering* ou le Lean Startup (Figure 5.3 à Figure 5.7). On notera à ce titre que le développement de produits mécatroniques offre différentes hybridations aux niveaux approche et processus. Les deux hybridations entre la conception systématique et Agile sont identifiées par un rectangle gris (Figure 5.4), tandis que les trois hybridations entre IS et Agile sont identifiées par un rectangle violet (Figure 5.7). Le développement de produits mécatroniques n'agrège toutefois qu'un seul **ensemble**, c'est-à-dire une approche soutenue par une combinaison de concepts et techniques reliant au moins un processus, une méthode et un outil. Cet **ensemble** est l'**ensemble** IS qui comprend le cycle en V comme processus, les pratiques basées sur les modèles et les pratiques dirigées par les modèles – *Model-based and model-driven practices* – en tant que méthodes, s'appuyant à leur tour sur de nombreuses techniques de modélisation système utilisées comme outils, et notamment le bloc *system modelling techniques*. Cette combinaison est considérée comme la **colonne vertébrale** de l'**ensemble** IS à laquelle d'autres concepts et techniques peuvent être attachés. Sur la Figure 5.3, on observe que cet **ensemble** IS est appuyé par de nombreuses références ce qui démontre un intérêt de la littérature sur le recours à des concepts et techniques relevant de cet **ensemble**. Cela permet ainsi d'envisager un possible consensus et de formuler une recommandation concernant l'utilisation de l'**ensemble** IS pour le développement de produits mécatroniques.

Faisant partie de cet **ensemble IS**, les modèles sont un moyen reconnu d'appréhender la complexité croissante des produits. Les principes mis en œuvre au sein de l'IS, combinés au cycle en V, peuvent également jouer un rôle dans la façon d'appréhender la complexité. Par ailleurs, cette **colonne vertébrale** de l'**ensemble IS** peut être complétée par la matrice de structure de conception – *design structure matrix* (DSM) – pour soutenir la complexité des produits. La DSM est alors associée aux pratiques basées sur les modèles (voir Figure 5.5). Toujours sur la Figure 5.5, différents auteurs explorent différentes techniques de modélisation telles que la modélisation orientée processus, orientée aspect, orientée objet ou fonctionnelle pour n'en citer que quelques-unes. Les langages de modélisation tels que l'UML, le SysML, mais également d'autres langages et représentations symboliques, sont intégrés au bloc « *System modelling techniques* » – présenté sur les Figure 5.3, Figure 5.4, et Figure 5.5. Ce bloc regroupe les travaux traitant de la modélisation au sens large. En effet, avant la démocratisation du SysML et de l'UML, certains auteurs tels que Buur et Andreasen (1989) défendaient déjà l'usage de modèles. Ainsi, le bloc « *System modelling techniques* » regroupe les travaux qui appuient le recours à la modélisation ou qui débattent de l'usage des langages de modélisation pour le développement de produits mécatroniques. Ce bloc est considéré comme un outil et peut soutenir le déploiement de pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles, voir Figure 5.3. Toutefois, certains auteurs mentionnent explicitement l'utilisation de diagrammes de blocs pour l'architecture et de diagrammes d'état ou d'activité pour la modélisation dynamique, qui précisent le type de diagrammes et de modélisation utilisés. Ainsi, ces types de diagrammes sont représentés séparément (Figure 5.3). De même, les réseaux de Petri et les graphes de liaisons – *bond graph* – sont également représentés comme des éléments séparés. En effet, les langages de modélisation énumérés ci-dessus sont axés sur les aspects sémantiques tandis que, les réseaux de Petri, bien que comportant également une partie sémantique, sont axés sur la modélisation dynamique (Habchi et Barthod, 2016). D'une manière similaire, les graphes de liaisons sont utilisés pour représenter les composants et les flux multi-physiques (Wu, He et Deng, 2012).

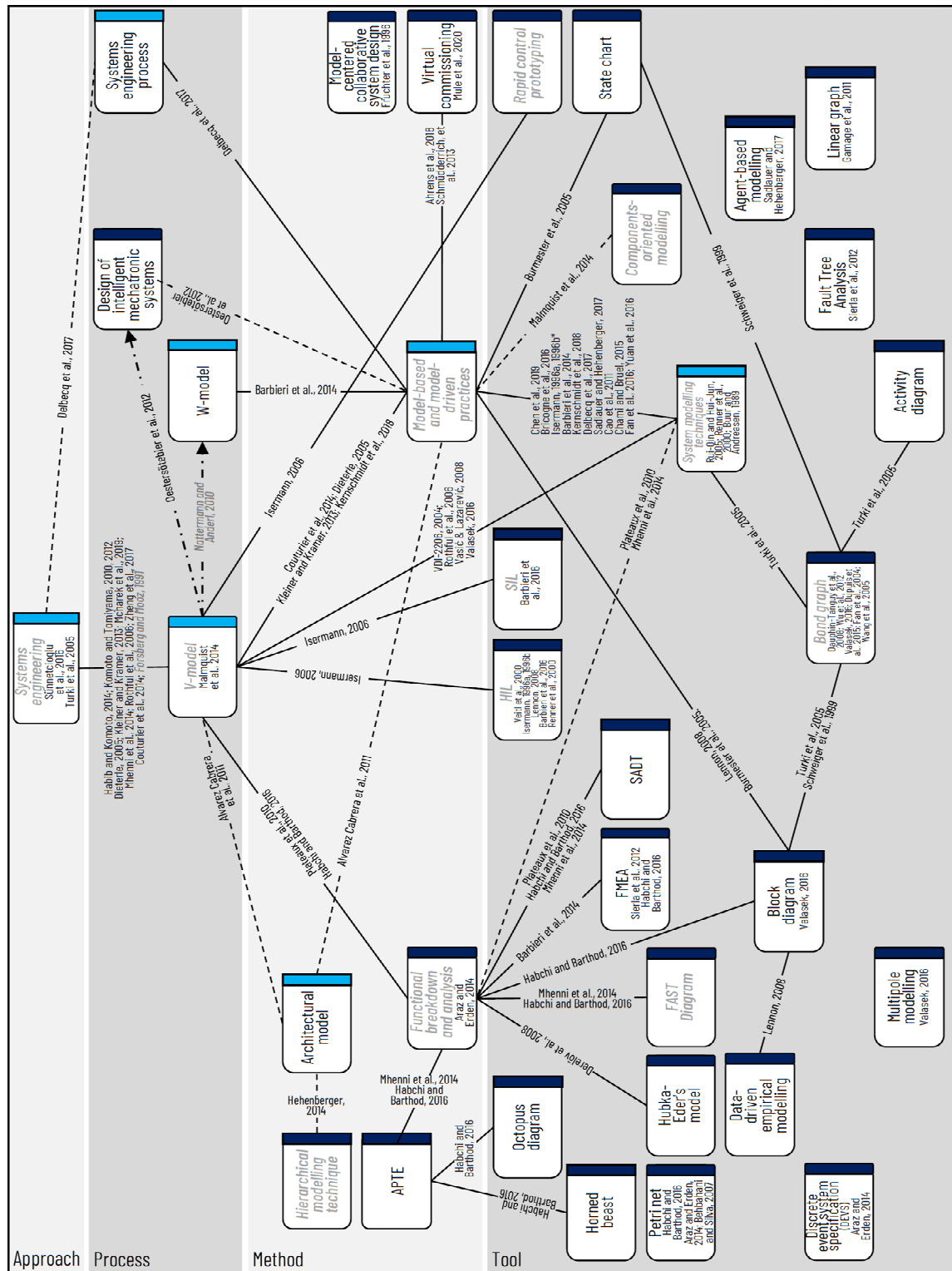


Figure 5.3 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur l'ensemble IS

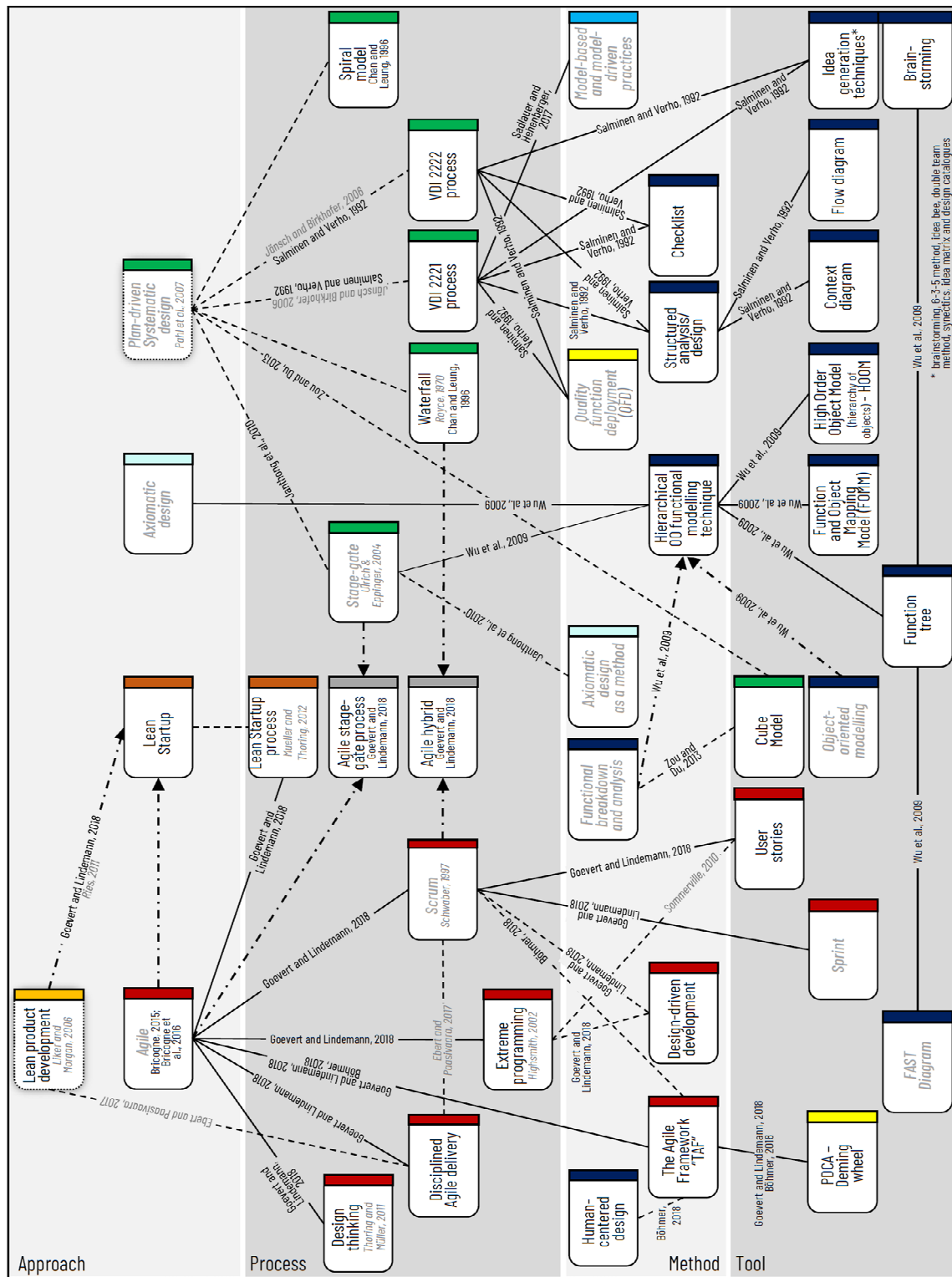
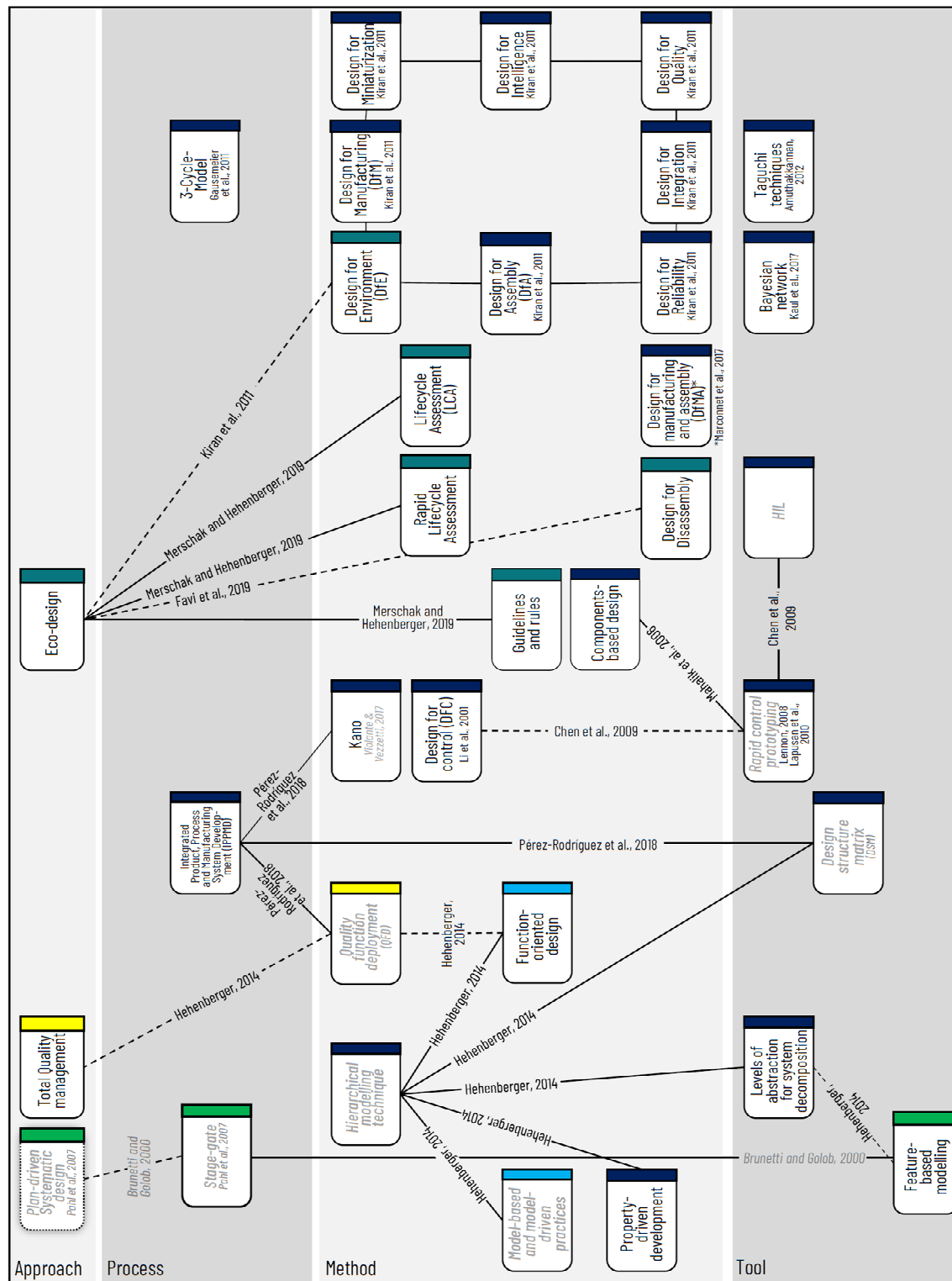


Figure 5.4 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur Agile et la conception systématique



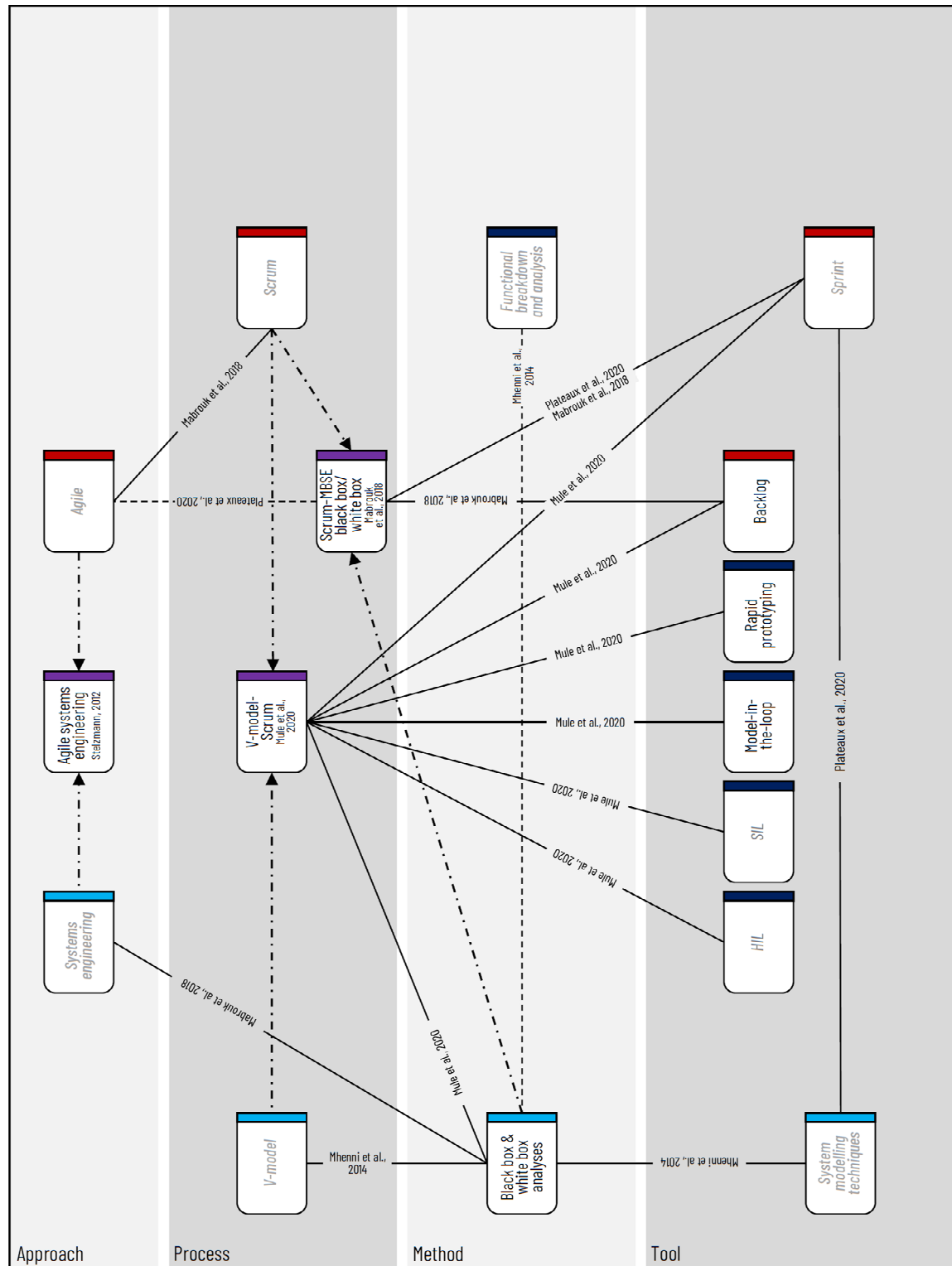


Figure 5.7 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement de produits mécatroniques - Vue centrée sur l'hybridation entre Agile et l'Ingénierie système

Au-delà des techniques de modélisation, d'autres pratiques suscitent un intérêt marqué dans la littérature. C'est le cas des pratiques en lien avec une logique fonctionnelle qui sont étudiées par différents auteurs. Cela comprend la décomposition et l'analyse fonctionnelle – *Functional breakdown and analysis* (Figure 5.3, Figure 5.4 et Figure 5.7) –, la modélisation fonctionnelle – *Functional modelling* (Figure 5.5) –, l'arbre fonctionnel – *Function tree* (Figure 5.4) –, la conception orientée fonction – *Function-oriented design* (Figure 5.6) –, mais aussi la modélisation fonction-comportement-état – *Function-Behavior-State modelling* – et la modélisation fonction-comportement-structure – *Function-Behavior-Structure modelling* (Figure 5.5) –, ainsi que le déploiement de la fonction qualité – *Quality Function Deployment* (QFD) – et les travaux proposés par Wu, Leu et Liu (2009) sur la Figure 5.4. Par ailleurs, une partie de ces concepts et techniques classés comme agnostiques – rectangle bleu foncé – peut être rattachée pour enrichir la **colonne vertébrale** de l'**ensemble IS**. Par exemple, la décomposition et l'analyse fonctionnelle et la modélisation Fonction-Comportement-État peuvent soutenir le cycle en V. De même, l'ingénierie à base de connaissances – *Knowledge-based engineering* (KBE) – représentée sur la Figure 5.5 est également étudié par divers auteurs et est lié à différentes pratiques de modélisation. En effet, il est possible d'extraire et de stocker les connaissances des modèles passés. Ces connaissances, à travers la réinstanciation de modèles, peuvent être réutilisées et permettre de construire des modèles plus rapidement et avec moins d'erreurs. Enfin, le *Hardware-in-the-loop* (HIL) et la conception modulaire sont discutés par différents auteurs et peuvent également trouver leur place dans l'**ensemble IS**, grâce à des liens avec le cycle en V pour HIL – voir Figure 5.3 – et avec la *Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems* (CONSENS), un dérivé du MBSE, pour la conception modulaire – voir Figure 5.5.

Le développement de produits mécatroniques est également soutenu par trois **ensembles** incomplets : Agile (Figure 5.4 et Figure 5.7), axiomatique (Figure 5.4 et Figure 5.5) et systématique (Figure 5.4 et Figure 5.6). Agile est ainsi soutenu par différents processus, peu de méthodes et d'outils, et leur manque de structuration empêche de constituer un **ensemble**. L'approche de conception axiomatique, ses extensions et usages en tant que méthode

(Figure 5.5) représentent les très rares blocs à appartenir à l'approche axiomatique en elle-même – le rectangle turquoise. Toutefois, la conception axiomatique peut s'appuyer sur d'autres concepts et techniques qui permettent de naviguer entre les domaines ou encore de soutenir leur décomposition (Schuh, Rudolf et Breunig, 2016 ; Wu, Leu et Liu, 2009). L'approche de conception systématique (Pahl *et al.*, 2007), identifiée par un rectangle vert, n'est quant à elle pas formellement nommée, mais les processus, méthodes et outils sont structurés et préfigurent un **ensemble** possible. On note à ce titre que Salminen et Verho sont parmi les premiers auteurs (1992) représentés au sein de la cartographie (Figure 5.4) à rassembler et à structurer un groupe cohérent de processus, de méthodes et d'outils, et à possiblement intégrer le niveau approche pour le développement de produits mécatroniques.

Parmi les autres approches, on pourra citer l'éco-conception – rectangle vert foncé –, représentée dans la Figure 5.6, qui n'est discutée qu'à travers des méthodes. La présence de l'approche du management de la qualité totale peut également être notée – *Total Quality management*, voir Figure 5.6. Cependant, ses concepts et techniques, identifiés par un rectangle jaune, tels que la QFD, la Maison de la qualité (HoQ) et le PDCA sont dispersés et rarement associés ensemble – voir Figure 5.4, Figure 5.5 et Figure 5.6. Par exemple, la QFD et le PDCA sont principalement rattachés à d'autres structures de concepts et techniques, notamment des **ensembles** incomplets. Selon les liens qui peuvent être observés sur la cartographie, la QFD peut être rattachée à l'**ensemble** incomplet de la conception systématique (Figure 5.4) et à celui de la conception axiomatique (Figure 5.5), tandis que le PDCA peut être intégré à l'**ensemble** incomplet Agile (Figure 5.4).

Parmi les concepts et les techniques proposés pour le développement de produits mécatroniques, des méthodes et outils peuvent porter un « héritage » technique, et nous en avons distingué trois qui sont un héritage mécanique, automatique et contrôle, et enfin logiciel. Un « héritage » de l'ingénierie mécanique est ainsi porté par des méthodes et des outils tels que la décomposition et l'analyse fonctionnelle (Plateaux *et al.*, 2010) (Figure 5.3), soutenus par le diagramme FAST (*Function analysis system technique*), ou encore l'APplication aux

Techniques d'Entreprise (APTE) soutenue par les diagrammes « pieuvre » et « bête à cornes », mais aussi par les pratiques de conception pour X – *Design for X* (DfX) – telles que le *Design for Manufacturing*, ou encore *Design for Assembly* (Figure 5.6) qui sont également mentionnées par quelques auteurs. Un « héritage » en lien avec l'automatique et le contrôle est également représenté sur la Figure 5.6 par le *Rapid control prototyping* (RCP), le HIL et la conception pour le contrôle – *Design for control* (DFC). Enfin, certains concepts et techniques sont ancrés dans le génie logiciel comme les *user stories*, l'Extreme Programming (XP), et Scrum pour n'en citer que quelques-uns – voir Figure 5.4. Cette observation tend à confirmer la déclaration faite par Sadlauer et Hehenberger lorsqu'ils mentionnent que « les publications actuelles sur la mécatronique reflètent l'influence passée de l'ingénierie mécanique » et qu'« avec les progrès rapides des technologies de l'information, l'importance des méthodes dans ce domaine augmentera progressivement l'utilisation des outils et des méthodes de conception issus de l'ingénierie logicielle en mécatronique » (Sادلauer et Hehenberger, 2017).

Une évolution dans la maturité du développement de produits mécatroniques peut également être observée. En énumérant les défis de la conception mécatronique, Alvarez Cabrera *et al.* (2010) mentionnent un « manque d'outils et de méthodes soutenant la conception multidisciplinaire ». Sur la base de la cartographie établie, la question du manque de concepts et techniques pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires peut être débattue. En effet, le développement de produits mécatroniques peut être soutenu par une variété importante de concepts et de techniques qui sont rassemblés dans la cartographie.

Pour résumer, le développement de produits mécatroniques est bien étudié dans la littérature scientifique et peut être soutenu par l'**ensemble IS**, dont la **colonne vertébrale** présentée ci-avant est enrichie par de multiples concepts et techniques. Cet **ensemble IS** est étayé par un nombre important de références qui permettent d'entrevoir une éventuelle recommandation concernant son utilisation par les entreprises désireuses de faire évoluer leurs pratiques de développement. Enfin, la cartographie indique la présence de trois **ensembles** incomplets que

sont Agile, conception systématique et conception axiomatique. La section suivante se concentre sur les SCP, autre type de produit multidisciplinaire.

5.3 Cartographie et synthèse du développement des systèmes cyber-physiques

Les SCP sont le deuxième des trois types de produits multidisciplinaires étudiés dans nos travaux. Au même titre que la mécanique, le développement des SCP est plus complexe que les produits dits « traditionnels » et Broy et Schmidt (2014) défendent en ce sens que « le passage des produits physiques aux SCP nécessite une approche d'ingénierie fondamentalement nouvelle ». Par rapport au développement de produits mécaniques, le développement des SCP est un domaine de recherche plus récent. En effet, la référence la plus ancienne concernant le développement des SCP dans nos résultats de recherche date de 2009.

Sur le même schéma que la section précédente, cette section présente la cartographie qui organise les différents concepts et techniques ainsi que leurs liens pour accompagner le développement des SCP. Certains concepts et techniques, ainsi que des références, ont été ajoutés pour améliorer la compréhension et la structuration globales. De la même manière que pour le développement mécanique, le développement des SCP rassemble un nombre important de concepts et de techniques qui sont représentés sur les Figure 5.8 et Figure 5.9. La Figure 5.8 se concentre sur les approches IS et Agile, tandis que la Figure 5.9 se concentre sur le triptyque *Platform-Based Design* (PBD), conception basée sur les contrats – *Contract-based design* – et conception basée sur les composants – *Component-based design*.

D'un point de vue général, si l'on examine la Figure 5.8, on constate en premier lieu la présence d'un **ensemble IS**, dont la **colonne vertébrale** est identique à celle du développement de produits mécaniques à travers le cycle en V, appuyé par les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles, soutenues par les techniques de modélisation système. On constate également une plus faible variété d'approches, alors que seuls l'IS et Agile sont abordés. L'approche Agile n'est toutefois pas formellement mentionnée, mais peut être mise en œuvre

par le biais des processus, méthodes et outils cités, permettant de constituer un **ensemble** incomplet Agile. On constate également que les processus répertoriés appartiennent aux approches susmentionnées, mais qu'ils s'appuient sur peu de références. À ce titre, le peu de références sur le cycle en V limite un éventuel consensus sur l'**ensemble** IS considéré dans son intégralité. Toutefois, il apparaît que le niveau méthode concentre une part importante des études, dont plusieurs intègrent l'usage des modèles et sont discutées ci-après.

Comme pour la mécanique, les niveaux méthode et outil intègrent des techniques de modélisation système – *System modelling techniques* –, des pratiques basées sur les modèles, telles que la conception basée sur les modèles, le développement basé sur les modèles, le MBSE, ou encore des pratiques dirigées par les modèles regroupés dans le bloc *Model-based and model-driven practices*. Les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles, les techniques de modélisation système et le lien qui les associe rassemblent une part importante des efforts de recherche comme le montre la Figure 5.8. Cette observation suggère un certain consensus quant à l'usage des techniques de modélisation système et de pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles pour le développement des SCP. Il est également à noter que certains auteurs explorent d'autres types de modélisation. Parmi eux, la modélisation basée sur les agents – *Agent-based modelling* (Figure 5.8) – semble se démarquer car discutée par différents auteurs. Cependant, la modélisation basée sur les agents reste un bloc isolé et se doit d'être intégrée dans un **ensemble**, ou *a minima* dans une structure de concepts et techniques.

Un autre groupe de méthodes suscite également beaucoup d'attention dans la littérature. En observant Figure 5.9, le triptyque PBD, conception basée sur les composants et conception basée sur les contrats, est étayé par différentes références. Cependant, cette association est principalement développée au niveau méthode et pourrait bénéficier d'une plus grande intégration avec les niveaux inférieurs et supérieurs. Au sein du triptyque, le lien entre la conception basée sur les composants et celle basée sur les contrats peut être considéré comme un consensus possible. Cependant, en ce qui concerne le reste du triptyque, certaines références

proviennent du même regroupement d'auteurs. Ainsi, le nombre de publications comme indicateur d'un possible consensus se doit d'être considéré avec prudence.

Concernant les méthodes, la conception centrée sur l'utilisateur et sur l'humain – sur la Figure 5.8 – rassemble également de multiples références. Cette prise en considération de l'humain ou de l'utilisateur au sein du développement des SCP suggère que ces derniers peuvent entretenir une interaction forte avec l'humain, contredisant possiblement une autonomie totalement indépendante de l'humain. Certaines de ces références renvoient par ailleurs à des publications en lien avec le développement de SCP pour le domaine médical, où le produit est construit autour des utilisateurs et interagit directement avec eux. On pourra faire mention de la discussion de Seshia *et al.* (2017) sur les « human CPS », où l'humain fait partie de la boucle de contrôle du SCP.

Le développement des SCP est fortement axé sur les techniques de modélisation et la constitution d'une architecture au détriment des niveaux processus et approche. De plus, alors que la mécatronique a rassemblé des méthodes et des outils issus du génie mécanique, du contrôle et du génie logiciel, les concepts et techniques pour le développement des SCP semblent principalement issus et tournés vers le génie logiciel. Cette observation semble aller dans le sens de la vision exposée par Bricogne, Le Duigou et Eynard (2016) qui suggèrent que les SCP ont émergé et restent fortement teintés de génie logiciel.

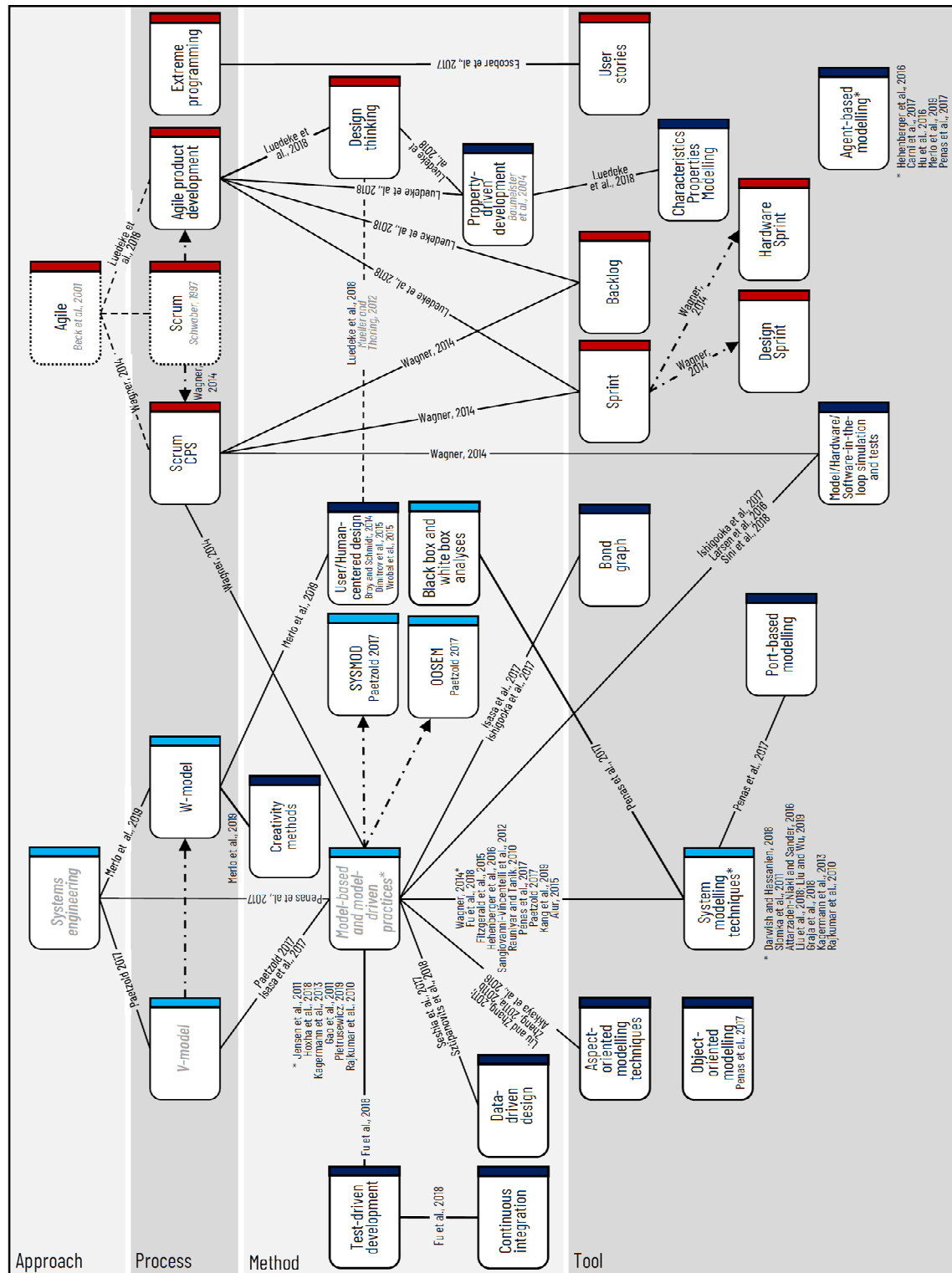


Figure 5.8 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des SCP – Vue centrée sur les concepts et techniques Agile et IS

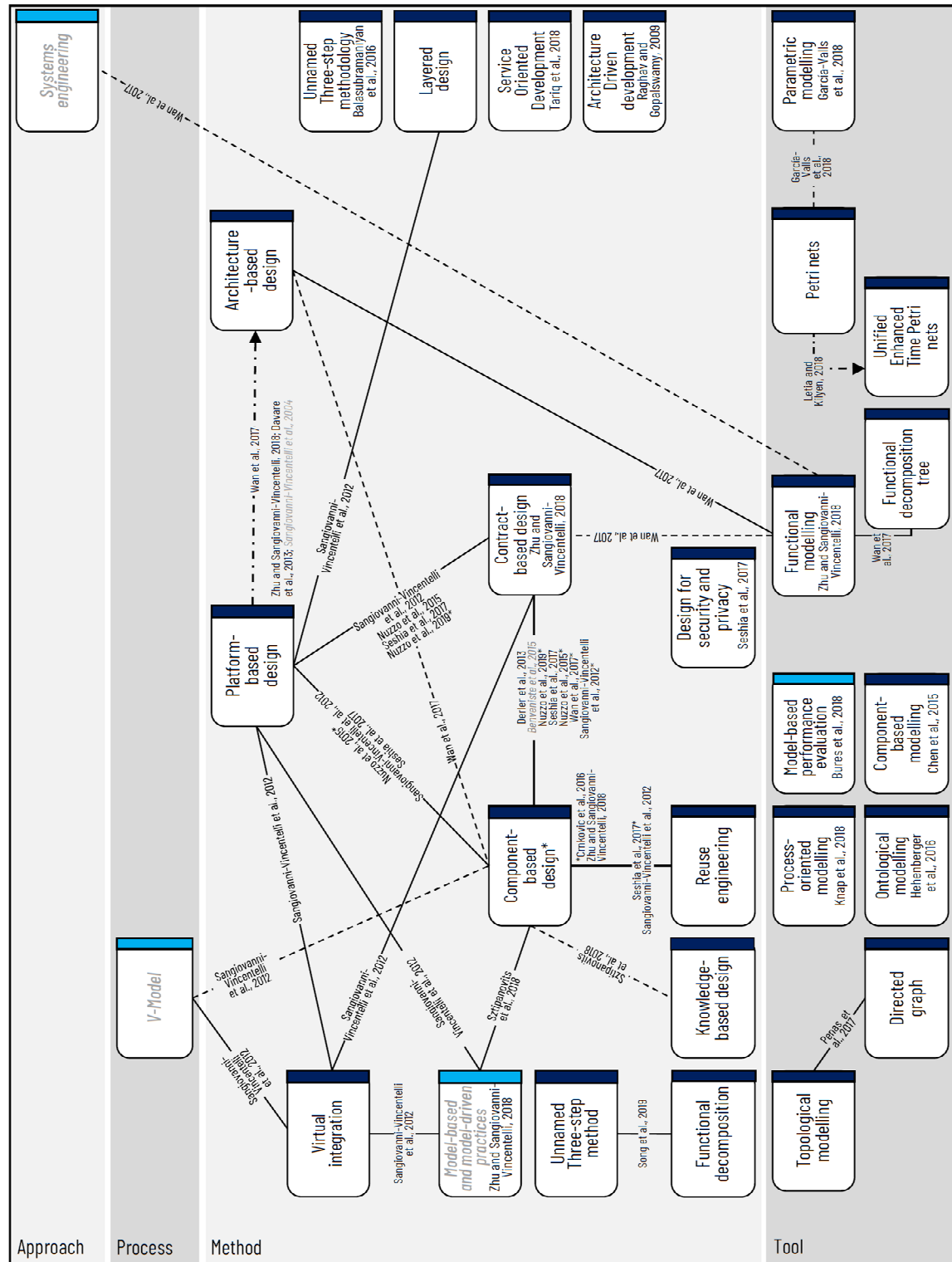


Figure 5.9 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des SCP – Autres concepts et techniques

Pour résumer, la modélisation est une pratique reconnue et un pilier du développement des SCP, qui permet de faire face à la complexité croissante des produits. Cette modélisation est principalement envisagée par le biais de pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles utilisant des langages standardisés représentées en majorité sur la Figure 5.8. Toutefois, des alternatives telles que la conception basée sur les composants et sur contrats (Figure 5.9) ou la modélisation basée sur les agents (Figure 5.8) suscitent également un intérêt significatif dans le domaine de la recherche. Il apparaît à travers la cartographie que l'accent semble être mis sur les méthodes. Par ailleurs, à travers les Figure 5.8 et Figure 5.9, on observe trois structures et pans de structures de concepts et techniques par à travers l'**ensemble IS**, l'**ensemble** incomplet Agile (Figure 5.8), et le triptyque PBD, conception basée sur les composants et conception basée sur les contrats (Figure 5.9). Actuellement, les entreprises désireuses de développer des SCP et de faire évoluer leurs pratiques de développement de produits peuvent se tourner vers la modélisation et les pratiques basées sur les modèles qui bénéficient d'un possible consensus de par le nombre de références associées.

Parallèlement aux SCP, les produits intelligents suscitent également un intérêt croissant. La section suivante explore leur développement.

5.4 Cartographie et synthèse du développement des produits « intelligents »

Comme pour les cartographies précédentes, cette section représente graphiquement les concepts et techniques recommandés pour le développement de produits intelligents, ainsi que leurs liens au sein d'une cartographie basée sur le modèle APMO. D'une manière similaire également, certains concepts et techniques ont été ajoutés pour améliorer la compréhension et la structuration globales, tels que l'approche de conception systématique, le processus Étape-jalon – *Stage-gate*, le processus NPD, l'IPPMMD ou encore la conception axiomatique – *Axiomatic design* (Suh, 1998). La cartographie des concepts et des techniques pour le développement de produits intelligents est représentée sur les Figure 5.10 et Figure 5.11. La Figure 5.10 se focalise sur l'IS et divers concepts et techniques, tandis que la Figure 5.11

regroupe l'éco-conception et le « S³ product development », un processus à la convergence du NPD et de l'IPPMd.

D'une manière générale, il ressort de la Figure 5.10 que, contrairement au développement de produits mécatroniques ou SCP, le développement de produits intelligents est appuyé par des concepts et techniques représentés par des blocs clairsemés sur les différents niveaux et soutenus par peu de références. Ce peu de références et donc d'agrégation ne permet pas d'entrevoir un consensus sur la manière de développer des produits intelligents. En effet, les cartographies de la mécatronique font apparaître des agrégations de références, qui permettent par la suite d'entrevoir d'éventuels consensus. Malgré cette absence de consensus pour le développement de produits intelligents, ce dernier pourrait bénéficier de la structure de l'**ensemble** IS principalement proposé par Tomiyama *et al.* (2019). L'**ensemble** IS proposé repose sur une **colonne vertébrale** similaire à celle identifiée pour le développement des produits mécatroniques et SCP. Cette **colonne vertébrale** est composée du cycle en V, ainsi que du MBSE soutenu par des techniques de modélisation système. Toutefois, on observe qu'aucun autre concept ou technique ne vient se greffer à cette **colonne vertébrale**. Par ailleurs, la présence de cet **ensemble** n'indique pas qu'il s'agit de la manière unique pour développer un produit intelligent. Cela suggère davantage une manière possible et cohérente pour soutenir le développement à travers une association compatible des concepts et techniques.

En ce qui concerne les autres approches, Agile (Figure 5.10), éco-conception et la conception durable (Figure 5.11) sont également abordées, ainsi que le LPD et une adaptation dénommée *Lean smart product development* (Figure 5.10). Exception faite de l'éco-conception (Figure 5.11), ces approches ne sont pas opérationnalisées à travers des liens vers des processus, méthodes ou outils.

Ces observations sur le développement de produits intelligents tendent à confirmer la déclaration d'Anderl, Picard et Albrecht (2013) concernant le fait que « bien que la

méthodologie de conception des produits mécatroniques soit très avancée, il n'existe pas de cadre pour le développement de produits intelligents ». De plus, Tomiyama *et al.* (2019) discutent de certaines limites concernant le développement de produits intelligents et de leurs caractéristiques. Ces caractéristiques pourraient rendre les méthodes et les outils existants inadaptés au développement de produits intelligents (Tomiyama *et al.*, 2019). La littérature présente en ce sens une variété de cadres, concepts et techniques qualifiés de « nouveaux », mais dont certains s'appuient, adaptent et étendent l'IS, le LPD, l'IPPM, ou même la QFD, avec des notions et principes sous-jacents similaires. Par ailleurs, ces concepts et techniques, que nous considérons comme dérivés, sont rarement associés avec d'autres concepts et techniques existants. Cela peut éventuellement réduire leur facilité d'utilisation et leur adoption par les entreprises.

Trois observations supplémentaires méritent d'être formulées. Premièrement, la conception modulaire (Figure 5.10) semble susciter un intérêt au sein de la littérature, mais se doit d'être positionnée dans une structure pour être mieux exploitée, par exemple, au sein d'un processus ou d'une approche. Cette conception modulaire peut contribuer à la fois à l'adaptation du produit aux attentes des utilisateurs et permettre la reconfiguration des produits. La deuxième observation est liée aux utilisateurs et à leur nécessaire prise en considération dans le développement. En effet, l'interaction avec l'utilisateur est un aspect important des produits intelligents (Kim, Sul et Choi, 2018 ; Rahimi et Ibarra, 2014 ; Säde, 1999 ; Tomiyama *et al.*, 2019 ; Zheng, Xu et Chen, 2020). Enfin, la troisième observation porte sur la Figure 5.11 qui intègre la boîte à outils des travaux proposés par Miranda *et al.* (2017) comportant 24 méthodes et outils. Ces travaux se distinguent en proposant davantage de structuration que le reste de la littérature du développement de produits intelligents. Cependant, les méthodes et outils mentionnés par Miranda *et al.* (2017) se réfèrent tous à des étapes du processus « S³ product development », mais ne sont pas agencés entre eux. Autrement dit, les outils sont directement rattachés au processus et ne soutiennent pas les méthodes.

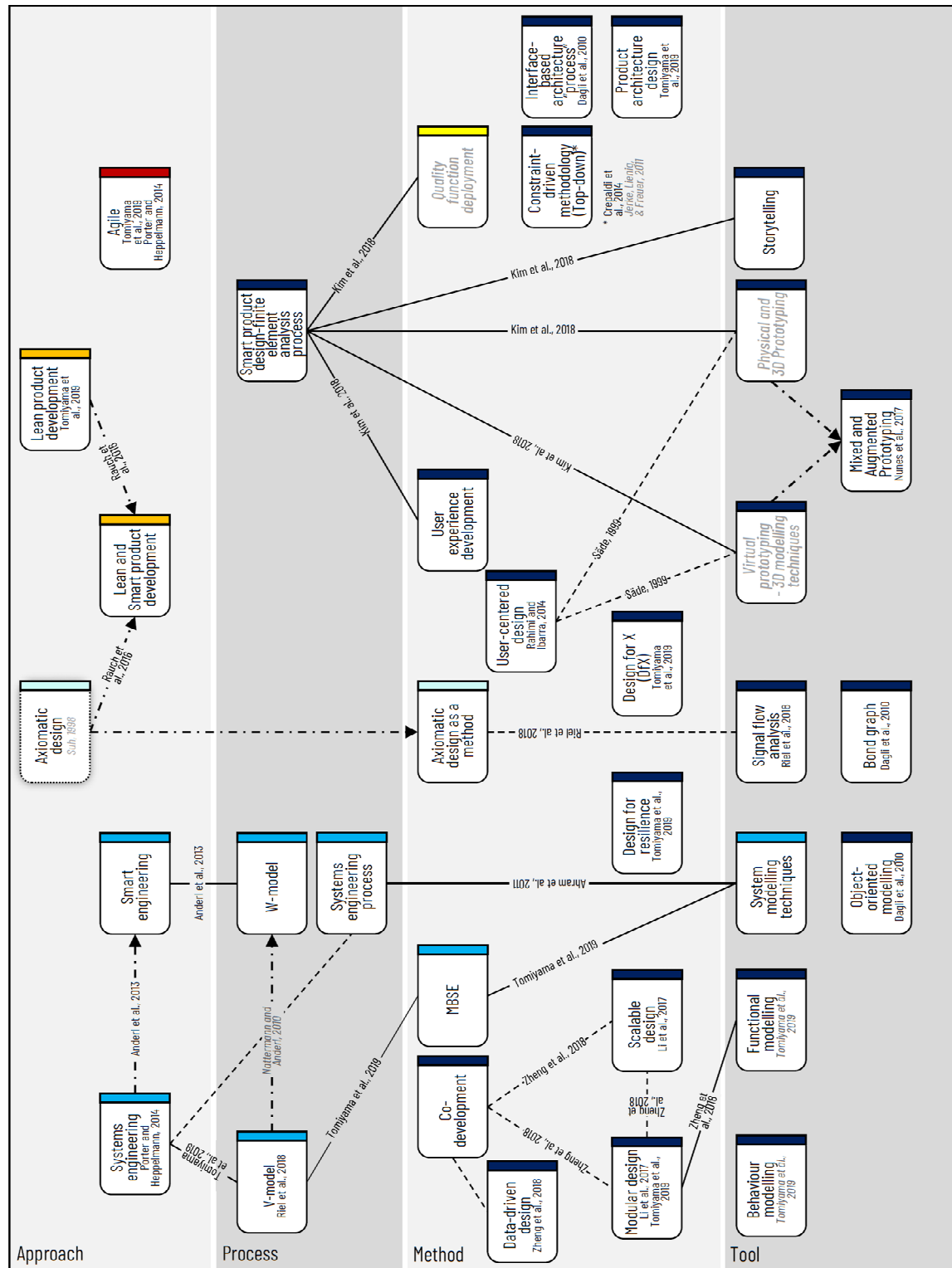


Figure 5.10 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des produits intelligents (1/2)

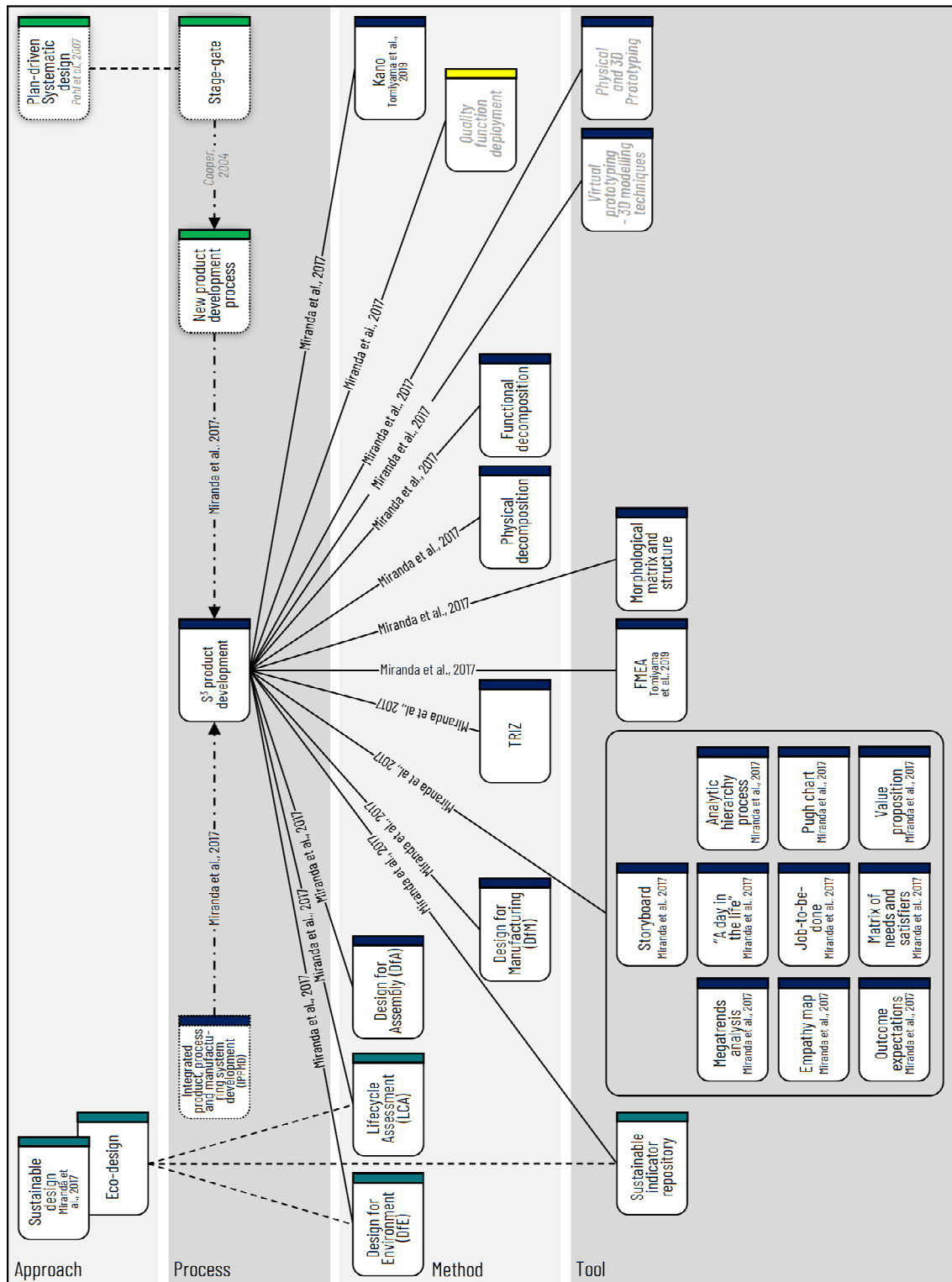


Figure 5.11 Cartographie des approches, processus, méthodes et outils pour le développement des produits intelligents (2/2)

En résumé, le développement de produits intelligents semble moins organisé et moins avancé que celui de la mécatronique et des SCP, malgré des similitudes entre les disciplines impliquées. Par rapport aux SCP et à la mécatronique, il n'existe pas de consensus ou d'orientation commune sur la manière de développer des produits intelligents. Les produits intelligents ne sont pas un nouveau type de produit, Såde les évoquait déjà en 1999. Cependant, comme cela a pu être mentionné dans la présentation de ce type de produit au chapitre 2, leur définition et les caractéristiques qui leur sont prêtées ont évolué au fil du temps. En conséquence, il est attendu que le développement des produits intelligents évolue conjointement. En effet, on envisage désormais les produits intelligents comme autonomes, résilients et qu'ils soient à même de faire face aux changements de l'environnement. Ainsi, selon Tomiyama *et al.* (2019) « la conception des produits intelligents ne concerne pas seulement le produit lui-même, mais aussi la conception du mécanisme permettant au produit de changer ou de se développer ». De plus, la collecte de données en lien avec l'utilisation du produit et les profils des utilisateurs pourrait également influencer les futurs développements de produits, notamment la phase de définition des exigences (Tomiyama *et al.*, 2019). Le paysage du développement de produits intelligents est donc amené à changer avec l'introduction de nouveaux concepts et techniques au bénéfice de leur développement.

5.5 Analyse des cartographies

Afin d'étayer les conclusions des sections précédentes et de comparer les cartographies des trois types de produits multidisciplinaires considérés, deux indicateurs sont introduits. Le premier indicateur (5.1) est lié à la densité d de la cartographie et correspond au nombre de liens continus divisé par le nombre de concepts et de techniques – le nombre de blocs de la cartographie. Ainsi, une densité d tendant vers zéro mettrait en évidence la présence de blocs isolés. À l'inverse, une cartographie dense – lorsque la densité d tend vers 1²³ ou dépasse 1 – indique que les concepts et techniques ont été associés, et sont donc possiblement structurés.

²³ Pour un graphe hiérarchique, pour x blocs, il y'aura $x-1$ liens. La densité résultante tend alors vers 1.

Ces concepts et techniques sont alors davantage susceptibles d'être intégrés et utilisés conjointement. Le deuxième indicateur (5.2) est lié à la notion de consensus, notée c . Le consensus peut être considéré comme le nombre de références divisé par le nombre de concepts et techniques. Cet indicateur cherche à mettre en lumière les niveaux contenant des concepts et techniques soutenus par de multiples références.

$$d = \frac{Nl}{Nb} \quad (5.1)$$

$$c = \frac{Nr}{Nb} \quad (5.2)$$

Le calcul de ces deux indicateurs s'appuie sur des données extraites depuis les cartographies. Au sein des formules (5.1) et (5.2) :

- Nb est le nombre de concepts et de techniques - le nombre de blocs ;
- Nl est le nombre de liens tracés en ligne continue ;
- Nr est le nombre de références.

Pour le comptage des références, une référence sur une ligne continue compte pour chaque bloc aux extrémités, et est donc comptée deux fois ; une référence sur une ligne interrompue n'est comptée qu'une fois ; une référence sur un lien d'hybridation ou un concept ou une technique dérivée est comptée une fois également – voir la Figure 5.1. Par ailleurs, lorsque plusieurs lignes interrompues convergent vers un bloc avec une référence similaire, la référence n'est comptée qu'une seule fois. Cela permet d'attribuer un poids plus important à la ligne continue et aux références qui lui sont associées, traduisant une volonté de structuration. Pour le comptage des blocs, seuls les blocs en trait continu sont comptabilisés.

Ces deux indicateurs ont été calculés pour la période couverte par la méthodologie de recherche présentée en section 5.1.1, soit de 1989 à 2019. La cartographie de la mécatronique compte

8 approches, 19 processus, 46 méthodes et 52 outils, soit un total de 125 concepts et techniques. Ces concepts et techniques sont liés par 106 lignes continues. Selon la formule (5.1), la densité d pour la cartographie de la mécatronique est de **0,85**. Le développement des SCP s'appuie sur 55 concepts et techniques répartis en 1 approche, 5 processus, 25 méthodes et 24 outils. On dénombre 41 liens en ligne continue. La densité d de la cartographie des SCP est de **0,75**. Pour le développement de produits intelligents, la cartographie regroupe 56 concepts et techniques répartis en 6 approches, 5 processus, 22 méthodes et 23 outils ; associés par 35 liens. La densité d résultante pour la cartographie de produits intelligents est donc de **0,63**.

La cartographie du développement de produits mécatroniques totalise 403 références réparties comme suit : 37 pour le niveau approche, 75 pour le niveau processus, 153 pour le niveau méthode et 138 pour le niveau outil. Par conséquent, le consensus général c pour le développement de produits mécatroniques est de **3,2**. La cartographie des SCP rassemble un total de 184 références réparties comme suit : 4 pour le niveau approche, 19 pour le niveau processus, 103 pour le niveau méthode et 58 pour le niveau outil. Il en résulte un consensus général c pour le développement SCP de **3,3**. La cartographie du développement de produits intelligents s'appuie sur 104 références, réparties comme suit : 8 pour le niveau approche, 36 pour le niveau processus, 31 pour le niveau méthode et 29 pour le niveau outil. Le consensus général c pour le développement de produits intelligents est alors de **1,9**.

Le consensus c est également calculé selon la formule (5.2) pour chaque niveau. Les résultats sont représentés dans le Tableau 5.1. Cette analyse permet de mettre en évidence les niveaux qui sont les plus susceptibles de suggérer un consensus de par un nombre important de références par bloc.

Premièrement, on peut observer que le développement de produits mécatroniques bénéficie de la densité générale la plus élevée, suivi par le développement des SCP et le développement de produits intelligents. Le développement des SCP bénéficie quant à lui du consensus général le

plus élevé suivi par le développement de produits mécatroniques puis le développement de produits intelligents.

Tableau 5.1 Synthèse des calculs de la densité générale et du consensus général et par niveau pour le développement des SCP, des produits mécatroniques et intelligents

Indicateurs	Développement de produits mécatroniques	Développement de SCP	Développement de produits intelligents
$d_{générale}$	0,85	0,75	0,63
$c_{général}$	3,2	3,3	1,9
$c_{approche}$	4,6	4,0	1,3
$c_{processus}$	3,9	3,8	7,2
$c_{méthode}$	3,3	4,1	1,4
c_{outil}	2,7	2,4	1,3

En examinant le développement de produits mécatroniques, on observe que le consensus par niveau est plus élevé aux niveaux approche et processus. Au contraire, la valeur au niveau outil est plus faible et tend à faire baisser le consensus général. Ces chiffres tendent à corroborer les observations faites dans la section 5.2. Si l'on analyse la cartographie, un nombre important de références sont rassemblées autour de l'**ensemble** IS et notamment ce que nous avons qualifié de **colonne vertébrale** – comprenant l'IS, le cycle en V, les pratiques dirigées et basées sur les modèles, et les techniques de modélisation système (voir Figure 5.3). Au niveau outil, les différentes techniques de modélisation rassemblent un grand nombre de références, mais sont contrebalancées par de nombreux blocs appuyés par une référence unique. Cela explique un consensus plus faible pour le niveau de l'outil. De plus, certains de ces blocs sont isolés, ce qui a également une influence négative sur la densité.

En ce qui concerne le développement des SCP, l'analyse du consensus par niveau tend à confirmer le fait que la littérature se concentre davantage sur le niveau méthode. Cela peut s'expliquer par les nombreuses références sur les pratiques basées sur les modèles et dirigées

par les modèles, ainsi que par le triptyque PBD, conception basée sur les composants et sur les contrats. Ainsi, le niveau méthode des SCP offre un consensus plus élevé que celui de la mécanique, ou encore celui des produits intelligents. Cependant, comme pour la mécanique, le niveau outil tend à diminuer le consensus général pour la même raison, qui est la présence de blocs isolés et appuyés par une référence unique. Enfin, le consensus pour les niveaux approche et processus semble relativement élevé. Cela s'explique par un faible nombre d'approches et de processus présents, combiné au poids accordé aux références sur une ligne continue – voir par exemple « Scrum CPS », Figure 5.8. Toutefois, sur la cartographie, ces niveaux approche et processus ne disposent pas d'un consensus.

Pour le développement de produits intelligents, le consensus aux niveaux approche, méthode et outil sont, dans le contexte du Tableau 5.1, relativement bas, ce qui, combiné à une densité plus faible que celles de deux autres types de développement, étaye nos observations d'un plus grand nombre de blocs individuels et appuyés par une référence unique. À l'opposé, le consensus du niveau processus se démarque nettement des autres valeurs du Tableau 5.1. Cette valeur s'explique à nouveau par le fait que le processus « S³ product development » proposé par Miranda *et al.* (2017) est lié aux différentes techniques de la boîte à outils proposée. Le bloc est donc appuyé par la référence comptée plusieurs fois, augmentant ainsi la valeur de l'indicateur. Dans les faits, le niveau processus du développement de produits intelligents ne dispose pas d'un consensus sur l'usage du « S³ product development », du fait que ce dernier est exclusivement cité par Miranda *et al.* (2017). Cet exemple permet toutefois de démontrer l'influence positive d'une structuration de concepts et techniques sur les indicateurs généraux, et notamment sur la densité. En effet, en excluant les travaux de Miranda *et al.* (2017) du calcul des indicateurs pour le développement de produits intelligents, le consensus *c* au niveau processus passe à **2,8** (contre 7,2), le consensus général *c* chute à **1,5** (contre 1,9) et la densité *d* à **0,31** (contre **0,63**).

Globalement, les indicateurs corroborent la synthèse des cartographies précédentes. Les indicateurs généraux tendent à lisser les variations sur les niveaux, et soulignent l'écart

entre d'un côté le développement mécatronique et SCP, et de l'autre le développement des produits intelligents. Le développement de produits mécatroniques et SCP combinent en effet un consensus plus élevé avec une cartographie plus dense, permettant de soutenir les entreprises dans l'adoption de nouvelles pratiques. Les entreprises peuvent effectivement s'appuyer sur la littérature scientifique et déployer des concepts et techniques en lien avec l'IS ou Agile, et plus spécifiquement les pratiques en lien avec l'usage de modèles et la modélisation. Le cas du développement de produits intelligents est à part avec la densité et le consensus général les plus faibles des trois types de produits. Enfin, il n'y a pas de consensus sur un usage de concepts et techniques qui pourraient guider les entreprises dans l'adoption de nouvelles pratiques à quelque niveau que ce soit.

La littérature offre ainsi un nombre relativement vaste de concepts et techniques, répartis et organisés sur un nombre important de figures. Dans un souci d'accompagnement, la section suivante propose une figure unique de synthèse.

5.6 Cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaires

Les sections précédentes ont traité du développement de ces trois types de produits de manière indépendante. Cependant, comme nous le verrons au prochain chapitre, les industriels ne se rapportent que très rarement à ces types de produits. Ainsi, dans un objectif d'accompagnement, nous avons synthétisé les neuf figures précédentes au sein d'une figure unique. Pour réaliser cette synthèse, le premier filtre proposé élimine les blocs isolés et ne comportant que peu de références. Ainsi, on ne retient que les blocs soutenus par au moins deux références distinctes. Le second filtre proposé permet de maximiser la présence de liens expressément cités, ce qui permet *in fine* d'obtenir une structure, ou des pans de structure, pouvant prendre la forme d'**ensembles**. Ainsi, nous nous appuyons exclusivement sur les références positionnées le long d'un trait continu, ou directement rattachées au bloc. Seuls quelques blocs isolés soutenus par plusieurs références apparaissent, compensant la perte de densité par un consensus plus important.

La cartographie de synthèse reprend la logique de la légende précédente, décrite sur la Figure 5.1. Elle se veut synthétique et apporte donc quelques simplifications : les liens indiquant les hybridations et dérivations, ceux propres à notre compréhension, ainsi que les références n'apparaissent plus. Seuls les blocs et les liens expressément cités sont conservés. Afin d'exprimer le « poids » des références, trois épaisseurs de lignes ont été définies et représentent respectivement les liens appuyés par au moins une référence, au moins 3 références, et au moins 10 références. L'ensemble de la codification adoptée est donc illustrée sur la Figure 5.12.

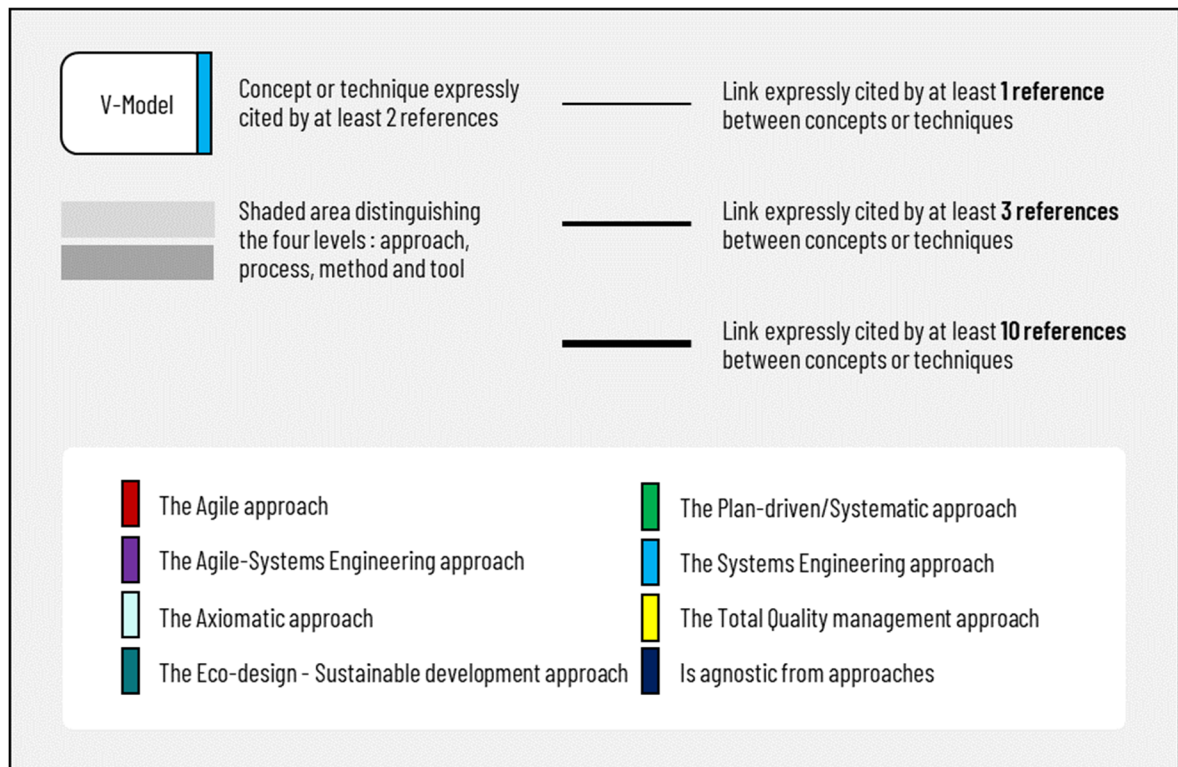


Figure 5.12 Légende et code couleur pour la cartographie de synthèse

S'appuyant sur cette codification, la Figure 5.13 représente notre cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaires. D'une manière générale, la cartographie de synthèse répertorie quatre approches que sont la conception axiomatique, l'IS, Agile et l'éco-conception. Sur les processus, on remarquera la présence de l'Étape-jalon – *Stage-gate* –, seul

bloc représentant la conception systématique – *Plan-driven*, rectangle vert – tout comme la QFD et le PDCA sont les seuls représentants de l’approche du management de la qualité totale – rectangle jaune clair. En termes de densité, au sens défini à la section précédente, quelques blocs isolés restent présents, tels que la conception axiomatique – rectangle turquoise –, Kano, les réseaux de Petri – *Petri net* –, la conception pour X – *Design for X* –, la modélisation basée sur les agents, et enfin ce qui touche au prototypage virtuel – *Virtual prototyping - 3D modelling techniques* – ou physique – *Physical and 3D Prototyping*. Toujours d’une perspective générale, il ressort de l’organisation de la figure trois « zones ».

Sur la gauche de la Figure 5.13, on retrouve la présence importante de méthodes et d’outils ayant trait à une logique fonctionnelle, à leur analyse, leur décomposition et leur modélisation. Cette présence avait été soulignée à la section 5.2 dans la section de synthèse du développement mécatronique. Pour ce qui est des méthodes intégrant la logique fonctionnelle, ces dernières sont reliées au cycle en V. Sur la gauche de la figure, on retrouve également le triptyque PBD, conception basée sur les composants et conception basée sur les contrats, ainsi que la conception centrée sur l’humain/l’utilisateur qui ont majoritairement été discuté dans le développement des SCP. Enfin, dans cette « zone » de la figure, on note la présence de la conception pour X regroupant celles issues des différentes cartographies, que sont par exemple *Design for Manufacturing*, *Design for Assembly*, ou encore *Design for Environment*.

Au centre de la Figure 5.13, il est possible d’identifier ce qui a trait à la modélisation et aux pratiques basées sur les modèles. On identifie clairement l’**ensemble IS** qui se distingue par des liens plus épais entre l’IS, le cycle en V, puis entre les pratiques basées sur les modèles et la modélisation, complété par des liens entre ces deux derniers et le cycle en V. Le cycle en W, une extension du cycle en V, est par ailleurs présent. Le consensus possible sur l’**ensemble IS** apparaît comme davantage marqué sur cette figure de synthèse, à travers l’épaisseur des liens, mais aussi par le nombre de blocs qui sont rattachés à sa **colonne vertébrale**, avec les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles et le cycle en V comme nœuds centraux.

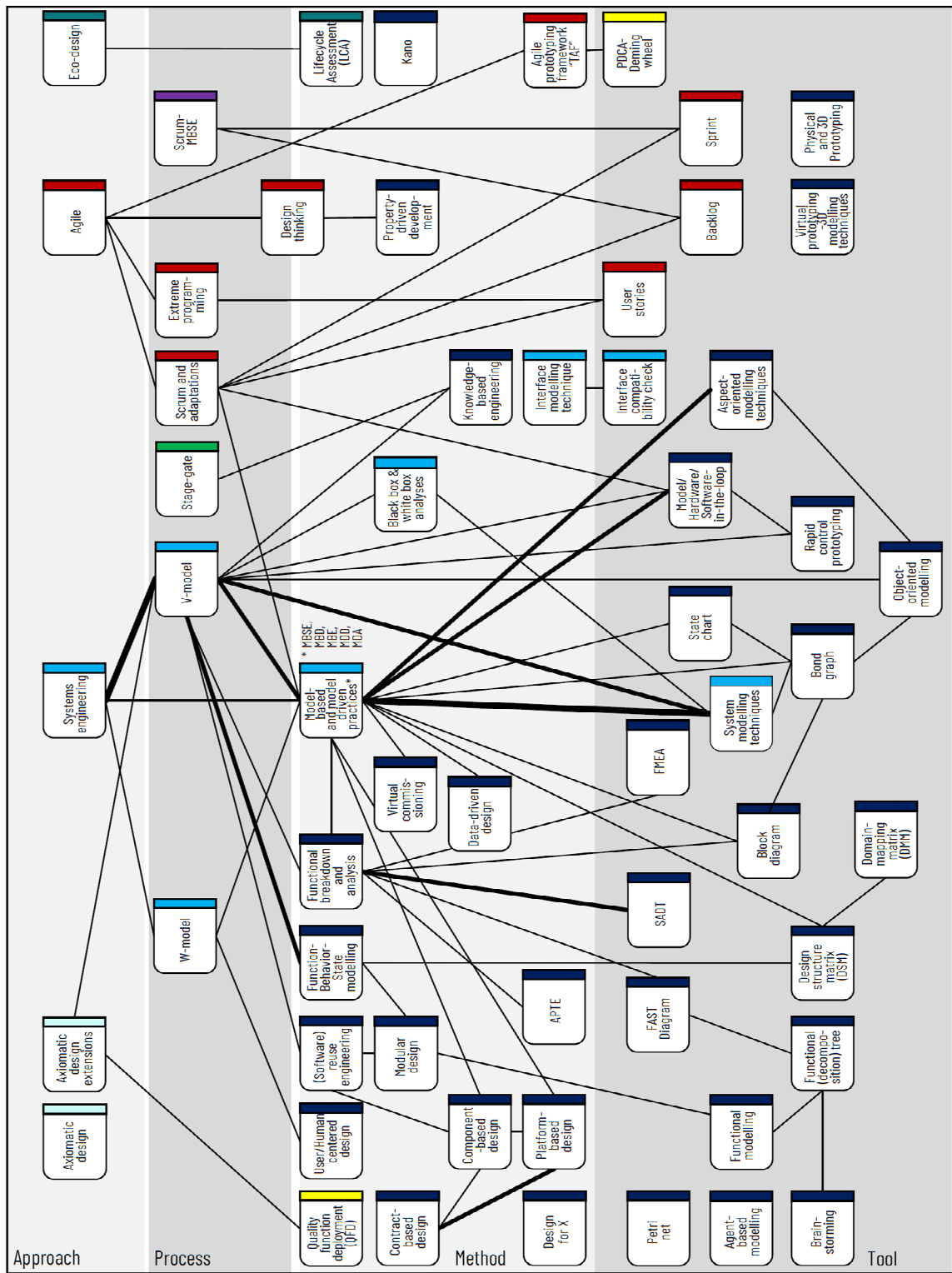


Figure 5.13 Cartographie de synthèse du développement de produits multidisciplinaires

Enfin, la partie droite de la Figure 5.13 rassemble essentiellement des concepts et techniques en lien avec l'approche Agile. Deux processus Agile sont majoritairement discutés, Scrum et XP, complété par le processus hybride entre IS et Agile « Scrum-MBSE ». À noter que *Design thinking*, de par une classification différente entre le développement mécatronique (considéré comme un processus d'après la description faite par Goevert et Lindemann (2018)) et SCP (considéré comme une méthode d'après les travaux de Luedeke *et al.* (2018)), chevauche les deux niveaux. Ce cas spécifique a été détaillé au chapitre 4, à la section 4.2.2. Sur les outils, on retrouve les trois outils généralement discutés en lien avec l'approche Agile que sont les *user stories*, le *backlog* et le *sprint*. On note également la présence de l'éco-conception et de l'analyse du cycle de vie. Concernant les liens, ces derniers contrastent avec le centre de la figure, avec aucun lien n'agréant plus de deux références.

À titre comparatif, les indicateurs présentés à la section précédente ont été calculés pour cette nouvelle cartographie. Avec un $c_{général}$ de **6,4** et une $d_{générale}$ de **1,2**, soit des valeurs supérieures à celles observées au Tableau 5.1, ce qui reflète le caractère synthétique de cette cartographie.

En guise de synthèse thématique, il apparaît que l'**ensemble IS** tend à être la forme de structure la plus complète (4 niveaux) et la plus appuyée par la littérature (de par l'épaisseur des liens). Comme le souligne Paetzold (2017), les « méthodes » d'IS se concentrent davantage sur l'analyse, la description, et l'appréhension de la complexité du produit. Ce constat peut être retrouvé sur notre cartographie de synthèse. Les pratiques basées et dirigées par les modèles et des techniques de modélisation système sont en effet tournées vers l'appréhension de la complexité croissante et cherchent à favoriser la collaboration. Par ailleurs, cet **ensemble IS** et sa **colonne vertébrale** sont complétés par d'autres concepts et techniques, ébauchant une structure cohérente pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires. C'est le cas des méthodes et d'outils ayant trait à une logique fonctionnelle, à leur analyse, leur décomposition et leur modélisation, et majoritairement tirés des cartographies de la mécatronique qui viennent se greffer à la **colonne vertébrale** de l'**ensemble IS**. À cet égard, selon Torry-Smith *et al.* (2011), citant les travaux de Buur, cette logique fonctionnelle peut

être étendue à toutes les disciplines, lui permettant d'être employée dans un développement de produit mécatronique. En conséquence, l'**ensemble** IS apparaît à l'issue de cette synthèse comme une option privilégiée, mais ni unique, ni immuable, pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires. En effet, bien qu'étant en retrait, car relativement moins discutée par la littérature, il convient de souligner la présence de l'approche Agile et de ses concepts et techniques associés, qui forment un **ensemble** incomplet, permettant aux entreprises d'envisager une autre structure. La section suivante revient sur les faits saillants de ce chapitre.

5.7 Synthèse : nos cartographies du développement de produits multidisciplinaires

Ce chapitre a mis l'accent sur la partie prescriptive du développement de produits multidisciplinaires et, notamment, comment ce dernier est abordé en termes de concepts et techniques, afin de répondre à notre **objectif spécifique de cartographie de la littérature scientifique**, illustré par le bandeau vert de la Figure 5.14. Cette dernière propose une vue de synthèse des résultats de ce chapitre. Le développement des produits multidisciplinaires a ainsi été exploré par le biais de trois types de produits que sont la mécatronique, les SCP et les produits intelligents, représentés sur la gauche dans l'encadré à fond noir. Au total, 236 concepts et techniques ont été identifiés²⁴ à partir de 167 publications scientifiques, dont 125 concepts et techniques pour le développement de produits mécatroniques, 55 pour le développement des SCP, et 56 pour le développement de produits intelligents – ces nombres sont rappelés avec les valeurs des densités et des consensus généraux dans la Figure 5.14. Ces concepts et techniques ont été classés comme une approche, un processus, une méthode ou un outil à l'aide du modèle APMO proposé et de l'arbre de décision associé introduit au CHAPITRE 4. Ces concepts et techniques ont par la suite été organisés et représentés dans des

²⁴ Il faut cependant préciser que ce ne sont pas 236 concepts et techniques distincts. Autrement dit, l'IS à titre d'exemple, est compté trois fois dans les 236 concepts et techniques, car cité pour le développement des chacun des trois types de produits considérés.

cartographies, une pour chaque type de produit – sur la gauche de la Figure 5.14 –, avant de présenter une cartographie de synthèse – sur la droite de cette même figure.

À travers la cartographie de synthèse qui regroupe des concepts et techniques ainsi que des structures à privilégier, il est ainsi possible de discerner une orientation potentielle pour les entreprises désireuses de faire évoluer leurs pratiques pour le développement de produits multidisciplinaires. L'ensemble de nos cartographies et des analyses qui en sont tirées forment le cœur de ce chapitre, représenté par l'encadré à fond gris et à contour pointillé.

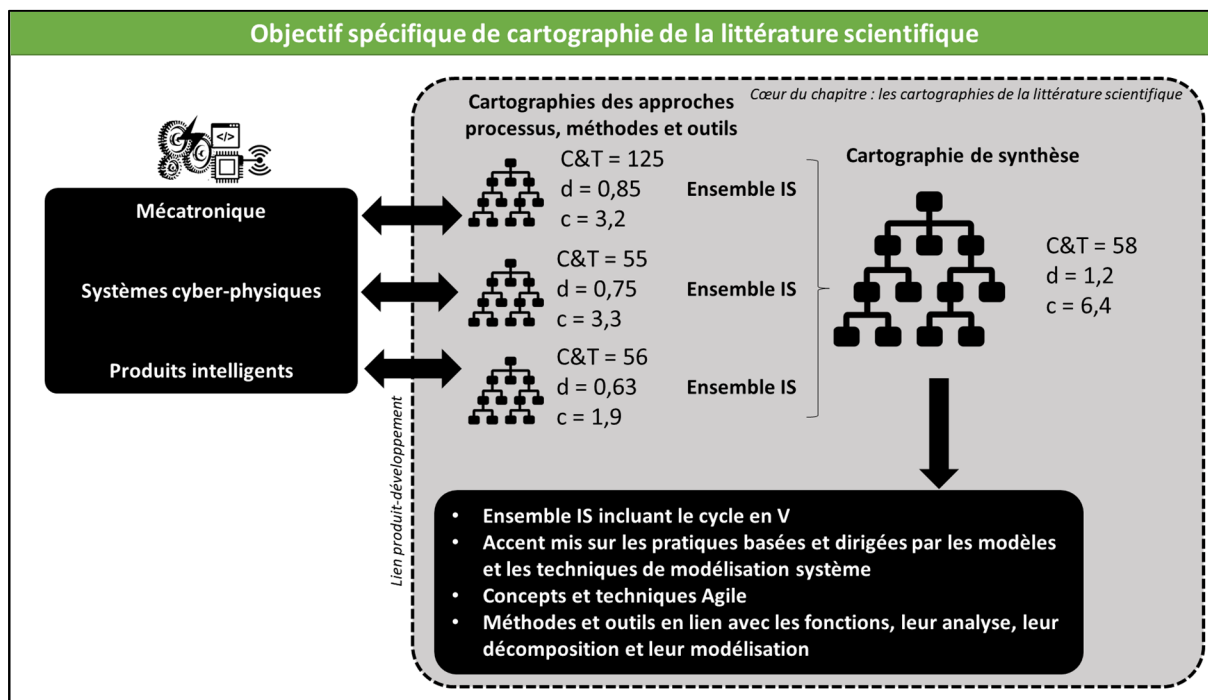


Figure 5.14 Synthèse du chapitre 5 : les cartographies et faits saillants

La contribution de ce chapitre est triple. Premièrement, le travail présenté offre une vue d'ensemble du développement de produits multidisciplinaires, à travers l'identification des approches, processus, méthodes et outils, et de leurs structurations qui peuvent soutenir le développement des produits mécatroniques, intelligents, et des SCP. Deuxièmement, à notre connaissance, il s'agit de l'un des rares travaux traitant simultanément du développement des

produits mécatroniques, intelligents et des SCP. Nos travaux permettent ainsi de mettre en évidence leurs différences et leurs points communs sur la base de leurs cartographies respectives et des indicateurs calculés. De surcroît, il s'agit également de l'un des rares travaux à représenter graphiquement le développement des produits mécatroniques, intelligents et des SCP issus de la littérature. Ce qui nous amène à notre troisième contribution : ces cartographies organisent le paysage fragmenté du développement de produits multidisciplinaires, et posent ainsi les fondations d'une base de connaissance structurée pour accompagner le développement de produits multidisciplinaires. Cette base de connaissance sous forme graphique permet de naviguer dans l'étendue des concepts et techniques proposés par la littérature scientifique. Les cartographies permettent ainsi d'identifier visuellement les structures de concepts et techniques que sont les **ensembles** et les **ensembles** incomplets qui peuvent ensuite être mises en œuvre au sein des entreprises. Pour déterminer les structures à privilégier, nous avons introduit la notion de consensus et de densité. Ces cartographies pourraient contribuer à guider les entreprises dans la transformation de leurs pratiques de développement de produits.

L'analyse approfondie des prescriptions de la littérature scientifique étant complétée, le chapitre suivant s'intéresse à la façon dont les entreprises développent leurs produits.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DESCRIPTIVE : LE DÉVELOPPEMENT DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES DANS L'INDUSTRIE

Le chapitre précédent s'est focalisé sur le développement de produits mécatroniques, SCP et de produits intelligents, ce qui a permis d'identifier des structurations de concepts et techniques pour appuyer le développement de produits multidisciplinaires. Néanmoins, les concepts et techniques discutés sont des recommandations de la littérature et leur application effective au sein des entreprises reste à déterminer. Ce chapitre cherche à répondre à notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles** et vise ainsi à documenter et analyser comment le développement de produits multidisciplinaires est mené en pratique. En ce sens, notre étude se base sur 12 entrevues semi-structurées réalisées au sein de 10 entreprises de divers secteurs industriels.

La première partie de ce chapitre présente la méthodologie d'entrevue – incluant les critères de sélection des participants, le processus et le guide d'entrevue, suivie de la présentation des participants dans un format anonyme – et de la méthodologie d'analyse des données. Le guide d'entrevue et l'analyse des données sont basés sur quatre thèmes qui abordent le contexte des entreprises, les produits développés et les disciplines impliquées, les concepts et techniques employés et les modalités de sélection des concepts et techniques. Ces quatre thèmes sont repris dans la structure de l'analyse des résultats formant la seconde partie du chapitre. Les données relatives au contexte des entreprises et les produits développés sont regroupés dans la section 6.2. L'analyse des concepts et techniques employés, présentée dans la section 6.3, s'appuie sur le modèle APMO introduit précédemment qui permet de cartographier la manière dont chacune des entreprises structure son développement de produits multidisciplinaires. Enfin, en section 6.4, l'analyse se concentre sur les changements conduits par les entreprises concernant leurs pratiques de développement de produits, à travers l'adaptation ou la sélection de nouvelles pratiques, ainsi que les facteurs influents. En fin de chapitre, une synthèse conclut notre étude des pratiques industrielles.

6.1 Méthodologie pour l'étude des pratiques industrielles en matière de développement de produits multidisciplinaires

Les entrevues semi-dirigées ont été sélectionnées comme technique de collecte de données (Johannesson et Perjons, 2014), combinées à une analyse de données qualitative. Le choix de l'entrevue semi-dirigée a été piloté par notre « objectif d'investigation » des pratiques de développement (Dresch, Lacerda et Antunes Jr, 2015), mais également par le fait que les entrevues sont appropriées pour collecter des informations à travers les expériences passées des répondants (Johannesson et Perjons, 2014 ; Rowley, 2012). L'entrevue semi-dirigée est un style d'entrevue flexible, qui recherche davantage un dialogue avec le répondant (Broom, 2005). De cette manière, nous ne nous limitons pas à un type de concepts et techniques. Enfin, selon Poulikidou *et al.* (2014), se référant aux travaux de Kvale et Brinkmann (2009), la taille moyenne de l'échantillon se compose de 15 ± 10 répondants.

La Figure 6.1 propose une vue d'ensemble de la démarche adoptée pour la conduite de l'étude des pratiques industrielles, à travers une séquence d'étapes débutant par la formulation des deux aspects clés de notre étude, soit la documentation des concepts et techniques, et les modalités de sélection et d'adaptation de ces dernières, suivie de la définition du guide d'entrevue, de leur conduite, de l'analyse et la représentation des résultats jusqu'à la comparaison avec les résultats du chapitre précédent et la formulation des recommandations qui prendra place au chapitre suivant. À noter que le guide d'entrevue, ainsi que le recrutement des participants et la restitution des résultats dans un format anonyme ont été approuvés par le comité d'éthique de l'ÉTS. Les sections suivantes détaillent chacune de ces différentes étapes en commençant par déterminer les critères suivant lesquels un participant est jugé comme recevable pour participer à l'étude.

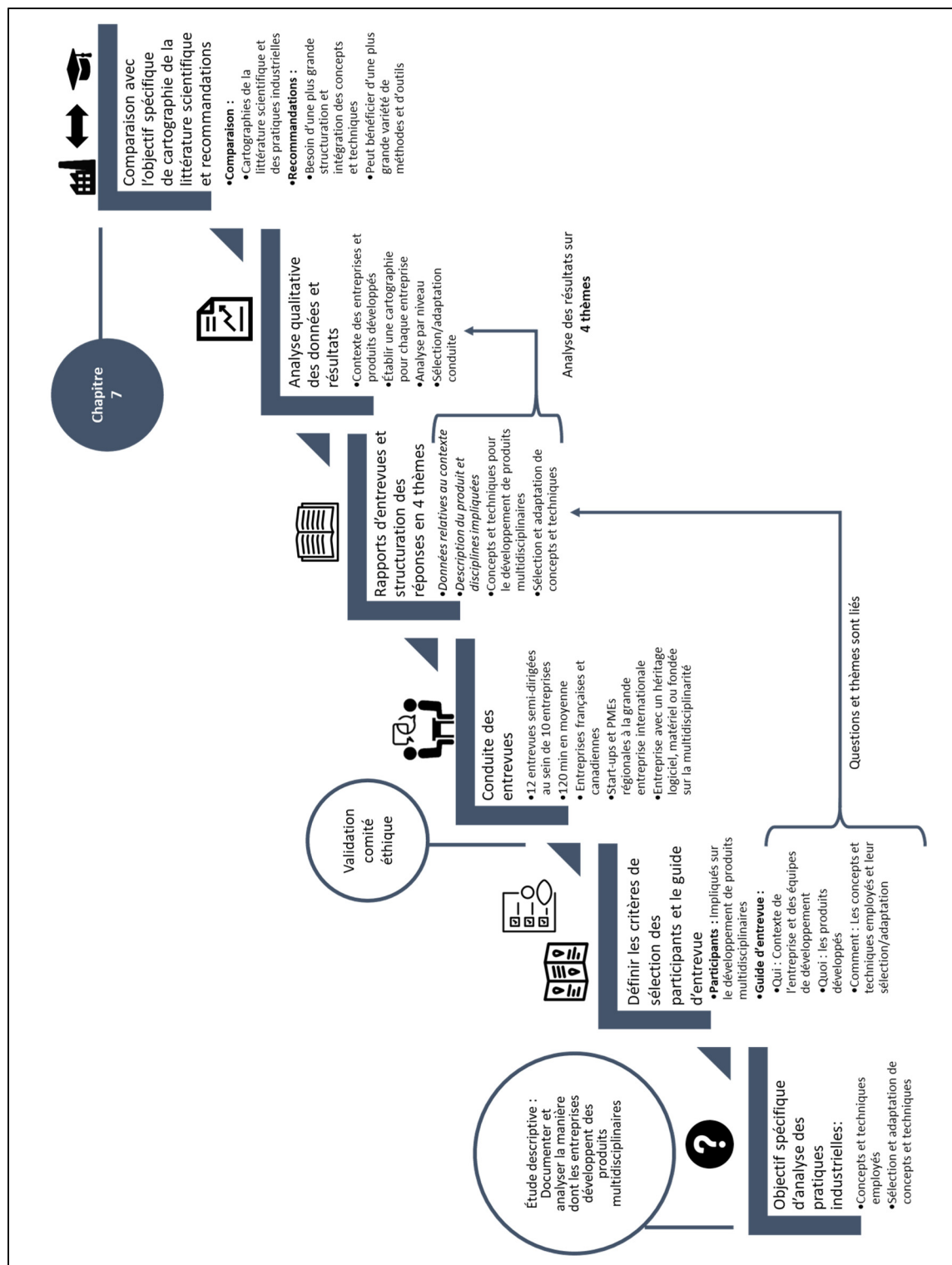


Figure 6.1 Vue d'ensemble de la méthodologie adoptée pour conduire l'étude des pratiques industrielles

6.1.1 Critères de sélection des participants

Quatre critères de sélection des participants ont été établis. Premièrement, la fonction occupée doit assurer une vue d'ensemble suffisante et un recul sur les pratiques employées. Les fonctions considérées sont celles de directeurs, gestionnaires, ou encore ingénieurs. Deuxièmement, les participants sélectionnés sont reconnus pour leur expertise industrielle dans une ou plusieurs disciplines du développement multidisciplinaire – mécanique, électricité, électronique, informatique et développement de logiciels, technologies de l'information et de la communication. Troisièmement, afin de garantir que l'entretien porte sur un développement multidisciplinaire, il est requis que les participants aient pris part à un développement de produits multidisciplinaires qui comprend au moins trois des disciplines mentionnées ci-dessus. Quatrièmement et dernièrement, afin de garantir une bonne compréhension des réponses, les personnes interrogées doivent pouvoir formuler leurs réponses en anglais ou en français.

6.1.2 Guide et processus d'entrevue

Afin de conduire les entrevues, un guide a été préparé en français et en anglais en amont des entrevues. Il inclut une présentation de nos travaux afin de clarifier la direction, les attentes et les buts poursuivis par l'entrevue, avant de s'attarder sur les questions. De par le caractère semi-dirigé des entrevues, les questions agissent comme un cadre et permettent d'engager l'entrevue. Ces questions cherchent à définir le contexte de l'entreprise et des équipes de développement (qui), le type de produits développés (quoi), la manière dont ces derniers ont été développés (comment), si des hybridations de concepts et techniques ont été réalisées, ou encore si une adaptation ou une sélection des concepts et techniques est conduite, ainsi que les facteurs et critères associés. Ces questions forment les 4 thèmes pour l'analyse des résultats et sont décrits plus loin dans ce chapitre.

En termes de déroulement, la durée moyenne d'une entrevue était de 120 minutes, et toutes les entrevues ont été réalisées en 8 mois à compter de la fin mai 2017. Sur les 12 entrevues réalisées, 10 ont été conduites en face à face et 2 ont été menées par visioconférence du fait de la localisation éloignée de l'entreprise, dans l'Ouest canadien.

6.1.3 Présentation des entreprises participantes

L'étude totalise 12 entretiens semi-directifs auprès de 10 entreprises au Canada (7) et en France (3). Ces 12 entrevues s'expliquent par le fait que deux entreprises ont proposé d'interroger un autre membre de l'équipe, ce qui apporte un point de vue complémentaire sur le développement de produits multidisciplinaires. Ces 10 entreprises sont présentées dans un format anonyme dans le Tableau 6.1. Un certain nombre de critères ont été établis afin de dresser un portrait représentatif de chaque entreprise. Premier des critères, la localisation nous renseigne sur le lieu d'exercice des personnes interrogées ; il porte également une dimension culturelle qui pourrait influencer le développement de produit. Le deuxième critère illustre la taille des entreprises interrogées, ces dernières allant de la *start-up* régionale à la grande entreprise internationale, en passant par la moyenne entreprise exportant dans le monde entier. Le troisième critère porte sur la date de création de l'entreprise et laisse apparaître 3 entreprises fondées avant 1990, 2 entreprises créées entre 1990 et 2000, 2 entreprises pour la période allant de 2000 à 2010, et enfin 3 entreprises au cours de la dernière décennie. Les quatrième et cinquième critères répertorient respectivement les disciplines maîtrisées à l'interne et les disciplines externalisées dans les projets multidisciplinaires passés. La combinaison des deux représente les disciplines impliquées dans les projets qui nous ont été présentés. À noter que pour l'entreprise « J », seul le logiciel est donné. Néanmoins, la personne interrogée a confirmé avoir participé à des développements de produits multidisciplinaires. Le critère suivant aborde la stratégie commerciale et indique donc vers qui sont tournées les entreprises. On retrouve alors les activités interentreprises – *business-to-business* (B2B) – et celles à destination des consommateurs – *business-to-consumer* (B2C). Par ailleurs, les entreprises « A », « B », « C » et « E » sont des centres de recherche orientés B2B et qui offrent comme service l'externalisation du développement de produits aux entreprises, ce qui est souligné par la

mention « B2B – Service » dans le Tableau 6.1. Le critère suivant évoque le champ d'expertise et renseigne sur les activités et le type de produits. Enfin, la dernière colonne indique la fonction des personnes interrogées et confirme qu'elles ont une vue d'ensemble sur les pratiques de développement de produits.

Tableau 6.1 Présentation des entreprises interrogées dans le cadre de nos travaux

Entreprise	Localisation	Nombre d'employés	Année de création	Disciplines maîtrisées à l'interne	Disciplines externalisées dans des projets passés	Stratégie commerciale	Champ d'expertise	Fonction des répondants (Nombre entrevues distinctes)
A	Canada	1-10	2011	Textile	E/E & Log	B2B -Service	Habillement, Vêtements intelligents	Directeur R&D et gestionnaire de projets (2)
B	Canada	11-50	2008	Log	Méca, E/E, Convt	B2B -Service	Imagerie numérique et médias interactifs	Directeur général et directeur R&D (1)
C	Canada	11-50	1983	E/E & Log	Méca & Textile	B2B -Service	Microélectronique et électronique	Directeur R&D (1)
D	Canada	> 250	1876	Log & Convt	Méca & E/E	B2B	TIC, Télécommunications	Gestionnaires, architectes systèmes, intégrateurs (1)
E	Canada	11-50	2008	Convt & E/E	Méca	B2B -Service	TIC, Télécommunications	Directeur R&D (1)
F	Canada	11-50	1995	Méca, E/E, Log, Convt	/	B2B & B2C	Équipement pour purification/stérilisation de l'air et de surfaces	Directeur de l'ingénierie (1)
G	Canada	51-250	1987	Méca, E/E, Log	Électronique & Log	B2C	Équipement agricole	Ingénieur R&D et Responsable R&D (2)
H	France	1-10	2012	Log, Méca, E/E	/	B2B	Objets connectés et média numérique	Directeur général (1)
I	France	1-10	2017	Log, Méca, Convt, E/E	Électronique (optimisation)	B2B & B2C	Objets connectés	Gestionnaire de la conception matérielle (1)
J	France	11-50	1994	Log	/	B2B	Développement logiciels commerciaux et pour la recherche	Directeur de projets (1)

Log=Logiciel, E/E=Électronique/Électricité, Méca=Mécanique, Convt=Connectivité
B2B = business-to-business, B2C = business-to-consumers
TIC = Technologies de l'information et de la communication

Les résultats du Tableau 6.1 sont complétés par la Figure 6.2 qui offre une représentation graphique de la diversité des entreprises interrogées à travers leur localisation, leur nombre d'employés, leur année de création, leur stratégie commerciale et les disciplines maîtrisées à l'interne, témoignant de la variété des milieux représentés. Il convient de noter que le total des entreprises pour la stratégie commerciale dépasse le nombre d'entreprises interrogées, car deux entreprises offrent à la fois des activités B2B et B2C. Sur les disciplines maîtrisées à l'interne, on observe qu'une majorité des entreprises internalisent du développement logiciel, à différents niveaux et pour différentes finalités, ce qui semble cohérent avec la tendance discutée au chapitre 1 de l'importance croissante du logiciel au sein des produits.

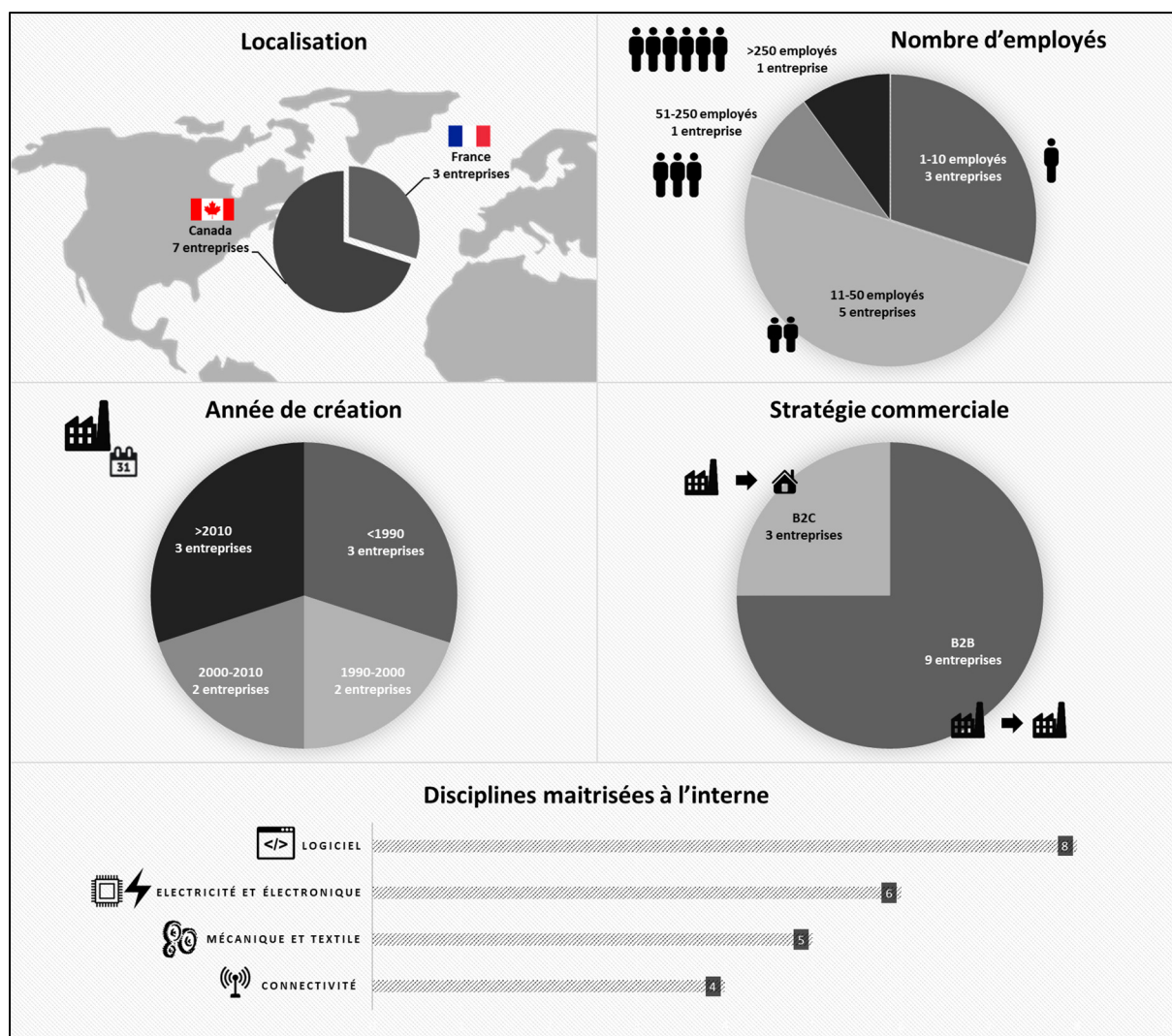


Figure 6.2 Vue d'ensemble de la diversité en termes de localisation, de nombre d'employés, d'année de création, de stratégie commerciale et de disciplines maîtrisées à l'interne

6.1.4 Résultats des entrevues : structuration en 4 thèmes

Après avoir conduit les entrevues, des rapports individuels ont été réalisés, et les données ont été organisées par thèmes selon les lignes directrices proposées par Rowley (2012). Ces différents thèmes sont tirés du guide d'entrevue (Broom, 2005) et sont dénommés « **données relatives au contexte** » (qui), « **description du produit et disciplines impliquées** » (quoi), « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** »

(comment) et enfin « **sélection et adaptation de concepts et techniques** ». Le premier thème rassemble des données relatives à la description de l'entreprise, ainsi qu'aux compétences et expériences professionnelles passées des répondants. Le deuxième thème s'attarde sur la caractérisation haut niveau des produits multidisciplinaires, ainsi que les disciplines impliquées pour leur développement. Nous n'avons cependant pas tenté de rapprocher les produits décrits des trois types de produits multidisciplinaires examinés au chapitre précédent. Le troisième thème documente les approches, processus, méthodes et outils employés par l'entreprise. Le quatrième thème rassemble des données concernant la sélection et l'adaptation des concepts et techniques, ainsi que des facteurs et critères ayant piloté ces dernières. Sur la base de ce regroupement par thème, une analyse qualitative a été conduite, et est détaillée dans la section suivante.

6.1.5 Analyse et représentation des résultats

Le regroupement par thème a permis de structurer les données, qui ont pu être analysées par une analyse de données qualitative. Le choix de l'analyse qualitative a été motivé par la description de phénomènes et de leur compréhension approfondie (Blessing et Chakrabarti, 2009 ; Sinkovics, Penz et Ghauri, 2005). Le regroupement par thème permet également d'analyser et de comparer des données sur un thème similaire. C'est notamment le cas pour le thème des « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** » où l'analyse et la comparaison s'appuient sur une cartographie exploitant le modèle en quatre niveaux et qui illustre pour chaque entreprise les concepts et techniques employés. À noter que l'arbre de décision est une nouvelle fois utilisé.

La Figure 6.3 correspond à une légère adaptation de la codification utilisée au chapitre précédent. La signification des blocs est adaptée aux besoins de l'étude des pratiques industrielles. Un bloc en trait continu indique un concept ou une technique « mentionné et utilisé » par l'entreprise pour le développement de produits multidisciplinaires. Un bloc en trait pointillé, indique toujours une interprétation de notre part, ici concernant l'usage d'un concept

ou d'une technique. Ce rapprochement entre un concept ou une technique se base sur des éléments rapportés par les répondants. Par ailleurs, la distinction entre « mentionné » et « utilisé » est explicitée au paragraphe suivant. Enfin, la signification des liens reste la même, avec un usage conjoint de deux concepts ou techniques formalisé par un trait continu, une hybridation soulignée par des flèches en trait mixte, et enfin la trame grise qui délimite la séparation entre nos quatre niveaux.

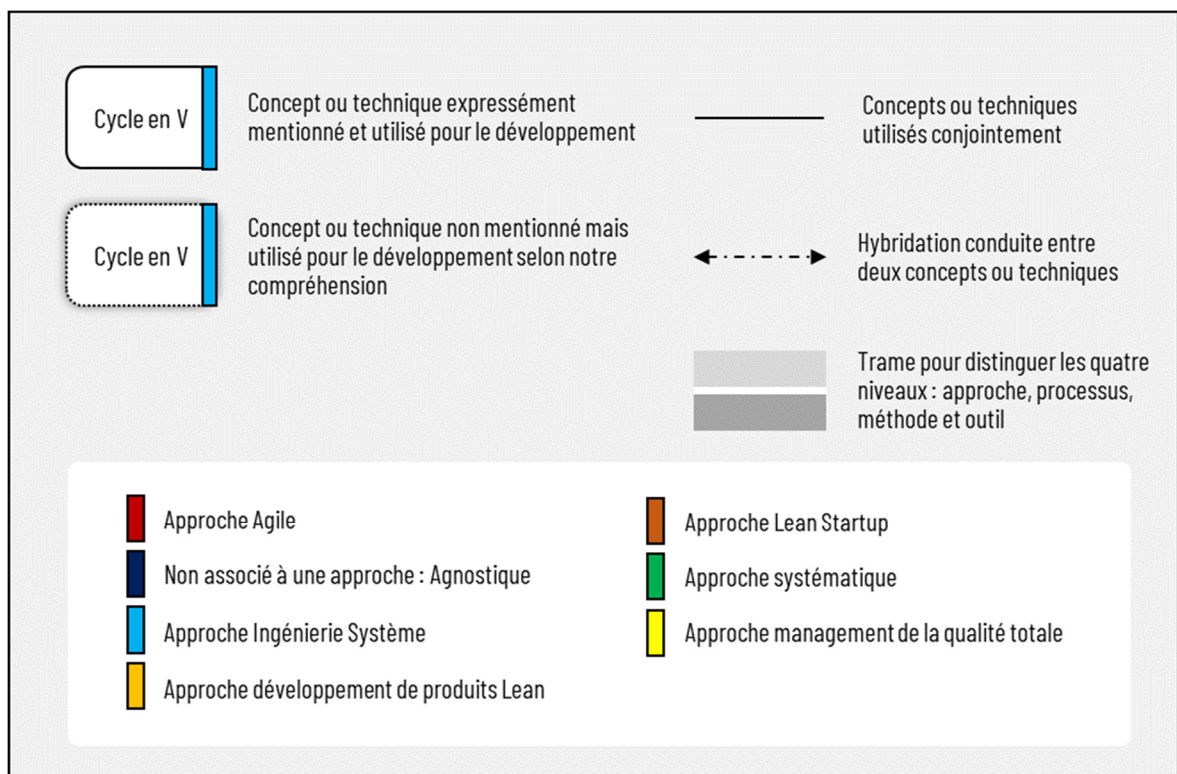


Figure 6.3 Légende pour la représentation des concepts et techniques pour les besoins de l'étude des pratiques industrielles

Pour les besoins de notre étude, une distinction a été introduite entre les concepts et techniques employés et/ou discutés, et donne lieu à trois cas de figure. Un concept ou une technique est considéré comme « **mentionné et utilisé** » lorsque les répondants l'ont à la fois expressément nommé et ont souligné son usage. À l'inverse, un concept ou une technique « **mentionné mais non utilisé** » a été nommé, et est donc connu, mais son usage n'a pas été expressément indiqué,

ou son non-usage a été formellement explicité. Enfin, un concept ou une technique « **non mentionné mais utilisé** » n'a pas été expressément nommé, mais son usage est déduit des pratiques décrites, ou d'un vocabulaire spécifique employé propre à un concept ou une technique.

Cette démarche méthodologique a permis de conduire nos 12 entrevues semi-dirigées dont les résultats sont rapportés ci-après. La section 6.2 porte sur les deux thèmes permettant de clarifier le contexte des entreprises et les produits développés. La section 6.3 porte sur le thème relatif aux « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** ». Enfin la section 6.4 aborde le thème « **sélection et adaptation de concepts et techniques** ».

6.2 Résultats de l'étude : contexte de l'entreprise et produits multidisciplinaires développés

Nos deux premiers thèmes couvrent le contexte lié à l'étude, à travers la collecte de données en lien avec l'entreprise, les équipes et les produits développés. Le Tableau 6.1 de présentation des entreprises et la Figure 6-2 s'appuient sur ces données. Il en ressort que notre étude couvre un large spectre de produits et une variété importante d'industries. Les entreprises interrogées sont de différentes tailles et de différents horizons, certaines étant ancrées dans un passé de développement de produits matériels, d'autres logiciels, alors que les *start-ups* « H » et « I » sont fondées sur la multidisciplinarité, avec toutefois un accent sur le développement logiciel. Ces données de contexte permettent de positionner le discours de nos interlocuteurs dans un cadre et de comprendre certains choix en matière de concepts et techniques.

La section suivante s'attarde sur le premier volet de notre **objectif spécifique** et le troisième thème à travers l'analyse des concepts et techniques employés.

6.3 Résultats de l'étude : concepts et techniques employés

Cette section porte sur la restitution des résultats pour le thème « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** ». Cette analyse est proposée en deux temps. D'abord, on analyse les cartographies des concepts et techniques « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés » qui permettent de représenter la façon dont chaque entreprise structure ses concepts et techniques. Ensuite, on analyse par niveau représentant les approches, processus, méthodes et outils « mentionnés et utilisés », « non mentionnés mais utilisés » et « mentionnés mais non utilisés ».

6.3.1 Cartographie des entreprises

L'analyse du thème de « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** » nous a permis de constituer les cartographies pour chacune des entreprises interrogées à travers les approches, processus, méthodes et outils « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés ». Ces 10 cartographies individuelles sont regroupées sur la Figure 6.4 et représentent les concepts et techniques employés au sein de chaque entreprise pour le développement de produits multidisciplinaires. Ces différents concepts et techniques ne sont donc pas tous nécessairement employés sur tous les développements. Enfin, les disciplines maîtrisées à l'interne sont rappelées par les pictogrammes : les engrenages pour la mécanique, le chandail pour le textile, la balise pour le logiciel, l'antenne pour la connectivité, et enfin la puce avec l'éclair pour l'électronique et l'électricité. Ces deux dernières disciplines sont utilisées conjointement, parfois par la même personne. L'identification des disciplines maîtrisées à l'interne peut permettre d'identifier un lien avec l'héritage matériel ou logiciel de certains concepts et techniques employés, ce qui est souligné au cours des sections 6.3.2 à 6.3.5.

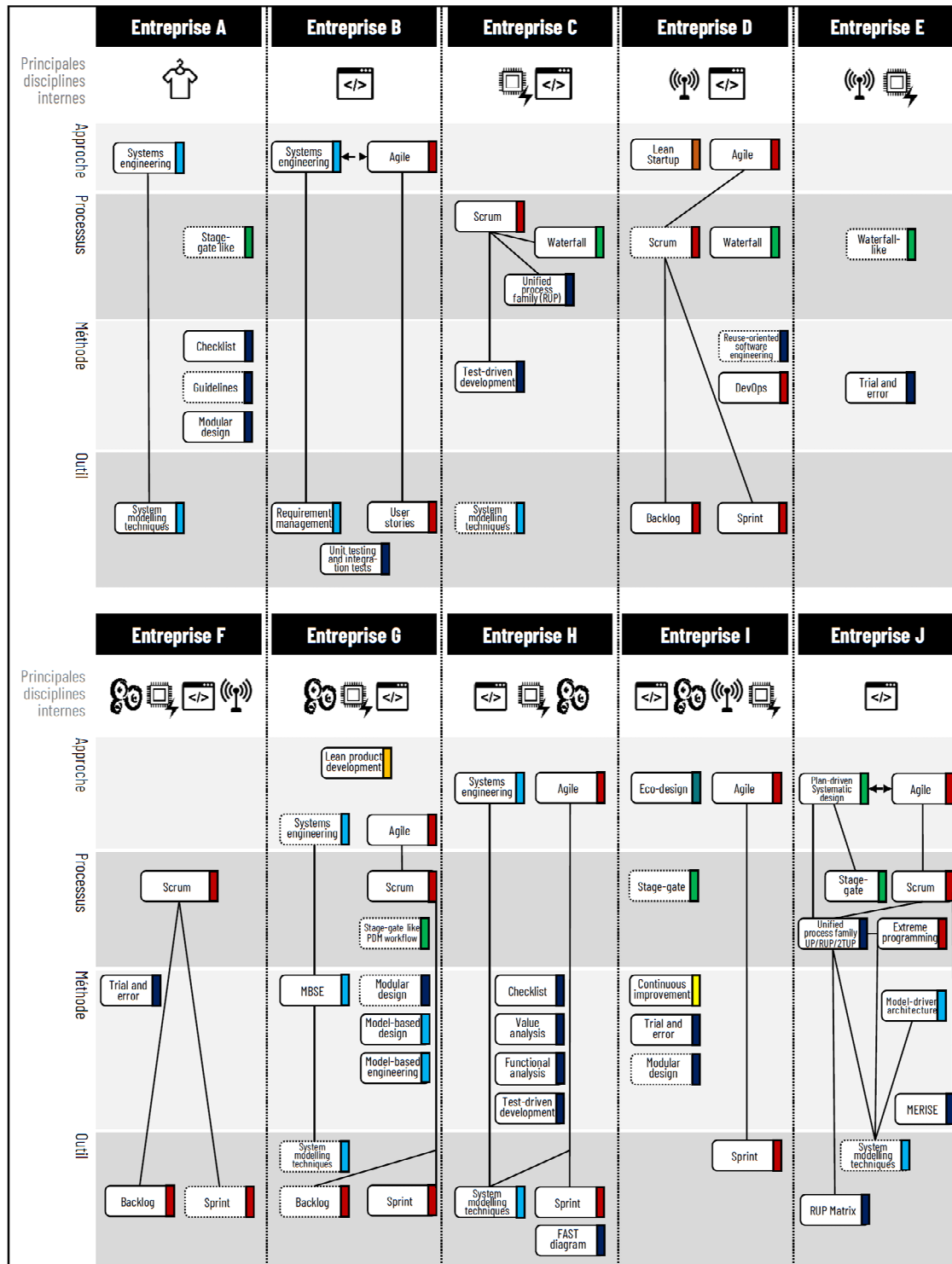


Figure 6.4 Approches, processus, méthodes et outils « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés » par les entreprises pour développer des produits multidisciplinaires

En observant la Figure 6.4, il apparaît que chaque entreprise utilise une combinaison différente de concepts et techniques, ce qui révèle une hétérogénéité dans la manière dont chacune des entreprises aborde le développement de ses produits multidisciplinaires. On observe toutefois certaines similitudes entre les entreprises dans les approches, processus et outils employés. Les méthodes, portant sur les règles et les pratiques d'ingénierie, demeurent quant à elles diverses. Par ailleurs, il apparaît que peu de liens sont exprimés entre les méthodes et les processus, ce qui nous amène à analyser la structure de développement au prochain paragraphe.

Des disparités dans la manière dont les entreprises structurent leurs concepts et techniques peuvent ainsi être observées. Sur la base des cartographies, les entreprises « D », « G » et « J » se distinguent par la présence de concepts et techniques utilisés sur chacun des quatre niveaux, avec trois niveaux interreliés, ce qui apparaît comme les entreprises les plus avancées de l'échantillon du point de vue de la structuration. Toutefois, sur la base des liens formalisés, aucune de ces entreprises ne semble constituer un **ensemble**. L'entreprise « J » s'en rapproche, mais les techniques de modélisation système – *System modelling techniques* – sont « non mentionnées mais utilisées », et non « mentionnées et utilisées ». Tirant également avantage des quatre niveaux, les entreprises « A » et « I » se positionnent juste après du fait de liens formalisés entre seulement deux niveaux. Les entreprises « C », « F » et « H », quant à elles, utilisent des concepts et techniques sur trois niveaux, et les entreprises « B » et « E », sur deux niveaux. Également lié à la manière dont les entreprises structurent leurs concepts et techniques, il apparaît au sein de l'échantillon que les entreprises qui font mention de l'approche Agile ou IS ne formalisent que rarement un processus et des méthodes en ligne avec l'approche mentionnée. Les entreprises « B » et « H » n'ont par ailleurs pas décrit ou expressément nommé de processus.

Enfin, en lien avec l'usage des concepts et techniques, les cartographies permettent de souligner quelques hybridations d'approches. L'entreprise « B » combine par exemple l'approche Agile et IS dans le cadre de projets où une approche ne peut prévaloir sur l'autre. Pour l'entreprise « J », l'approche est sélectionnée le long d'un continuum entre l'approche de

conception systématique et l'approche Agile en fonction des situations, ce qui nous apparaît comme une hybridation.

Cette section a permis de souligner une hétérogénéité dans l'usage et la structuration des concepts et techniques et a offert une vue globale du développement de produits. Les sections suivantes s'attardent sur chacun des différents niveaux afin d'analyser de manière plus approfondie chacun des niveaux en commençant par le niveau approche.

6.3.2 Approches discutées et/ou employées par les entreprises

L'approche peut être envisagée comme une philosophie ; c'est un regroupement de principes permettant d'aborder le développement de produits de manière macroscopique. Son applicabilité dépend de la transposition de ces principes au sein des processus, méthodes et outils. L'étude a permis de recenser sept approches regroupées dans la Figure 6.5 qui indique dans quelles proportions ces dernières sont « mentionnées et utilisées », « non mentionnées mais utilisées », ou encore « mentionnées mais non utilisées » par les entreprises. Les différentes approches sont détaillées dans les prochains paragraphes.

Sur les approches « mentionnées et utilisées », il en ressort qu'une majorité d'entreprises, dont plusieurs ayant un héritage ancré dans le développement logiciel, ont déclaré s'appuyer sur l'approche Agile. Cependant, certains interlocuteurs ont porté un regard critique ou exprimé des réserves quant à l'utilisation de l'approche Agile. Tout d'abord, les entreprises « E » et « F » ont mentionné l'approche Agile mais ont écarté son usage. Pour l'entreprise « F », l'approche Agile n'est pas utilisée, car aucun utilisateur n'est impliqué dans la boucle. De plus, ce qui a été qualifié de « vrai Agile » ne peut pas être utilisé du fait que la partie matérielle requiert trop d'itérations, ce qui engendre des coûts. L'entreprise « E » a seulement mentionné ne pas l'utiliser. Les entreprises « D » et « J » utilisent toutes deux l'approche Agile, mais questionnent son utilisation systématique. Une personne interrogée de l'entreprise « D » a estimé qu'Agile est parfois utilisé en raison de sa réputation, allant jusqu'à souligner

qu'« Agile is used religiously ». Partageant également un point de vue critique sur l'application de l'approche Agile, le répondant de l'entreprise « J » a déclaré qu'« Agile n'est pas une méthode miracle qui doit être appliquée tout le temps ».

La deuxième approche la plus utilisée est l'IS, dont l'usage a été motivé par différentes raisons. L'entreprise « B » utilise l'IS, car le responsable de la R&D travaillait auparavant dans l'industrie aérospatiale et a donc apporté une perspective différente à cette entreprise. D'une manière similaire, l'entreprise « H » l'utilise en raison de l'expérience acquise de la personne interrogée. L'entreprise « G » ne l'utilise pas expressément, mais selon notre compréhension, c'est l'approche que la personne interrogée essaie de mettre en œuvre grâce à l'utilisation croissante du MBSE, à la modélisation des systèmes et au souhait d'effectuer davantage de tests.

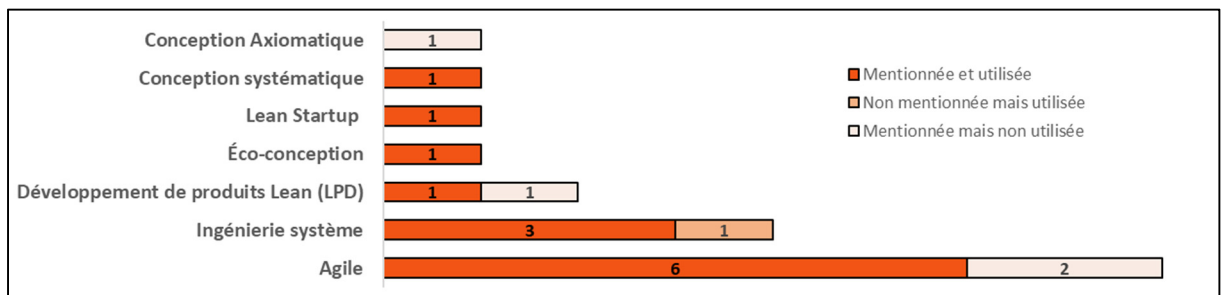


Figure 6.5 Approches mentionnées et utilisées, non mentionnées mais utilisées et mentionnées mais non utilisées par les entreprises

Avec moins d'occurrences, l'approche de développement de produits Lean (LPD) est « mentionnée et utilisée » par l'entreprise « G ». Basée sur une combinaison entre le Lean et l'Agile (Ries, 2011), l'approche Lean Startup est utilisée par l'entreprise « D » au sein de leur incubateur d'idées pour converger vers un produit minimum viable en 8 semaines. La conception systématique et l'Éco-conception complètent les approches mentionnées et utilisées. Enfin, la conception axiomatique est connue, mais non utilisée par l'entreprise « H » qui considère qu'elle ne permet pas une conception intégrée, ce qui empêche sa mise en œuvre.

De par leur collection de principes de haut niveau, les approches infusent la structure du développement. Elles peuvent alors être opérationnalisées par des processus, méthodes et outils. La section suivante s'attarde sur l'analyse du niveau processus.

6.3.3 Processus discutés et/ou employés par les entreprises

Les processus visent à travers une série d'étapes à organiser le développement du produit. La Figure 6.6 représente la variété des processus « mentionnés et utilisés », « non mentionnés mais utilisés » et « mentionnés mais non utilisés » par les entreprises pour mener un développement de produits multidisciplinaires. Sur la base de la Figure 6.4, il nous est possible d'observer que les processus « mentionnés et utilisés » au moins une fois peuvent être organisés en trois catégories : les processus Agile (rectangle rouge), les processus en lien avec la conception systématique (rectangle vert) et les processus agnostiques (rectangle bleu foncé). Deux processus Agile sont utilisés, XP et Scrum, et deux processus en lien avec la conception systématique sont utilisés, Cascade et Étape-jalon. Sur la troisième catégorie, nous retrouvons la famille des processus unifiés – *Unified Process* (UP), *Rational Unified Process* (RUP) et *Two Tracks Unified Process* (2TUP). Les paragraphes suivants abordent les processus de ces trois catégories.

Scrum est le processus le plus « mentionné et utilisé ». Cependant, malgré un nombre similaire (6) d'entreprises faisant usage de processus Agile – explicités par un rectangle rouge – et de l'approche Agile, l'association n'est pas systématiquement exprimée.

Le processus Étape-jalon est « mentionné et utilisé » par l'entreprise « J ». Pour d'autres entreprises, il est interprété à partir des pratiques décrites. Cette interprétation repose sur un parallèle possible avec des phases de *preliminary design*, *conceptual design* et *detailed design*, ainsi que par des jalons de validation. Par exemple, l'entreprise « G » s'appuie sur un flux de travail au sein de leur logiciel de type *product data management* (PDM), qui prend la forme d'un processus étape-jalon de haut-niveau, avec des étapes de concepts, de prototypage, de

mise en production et des validations intermédiaires. L'entreprise « A » a décrit un processus comportant des phases de conception préliminaire et détaillée qui a donc été assimilé à un processus Étape-jalon. L'entreprise « I », quant à elle, est contrainte par des délais externes, et peut donc s'appuyer sur un processus de type étape-jalon pour la gouvernance globale. Faisant également partie des processus de conception systématique, le modèle en cascade est utilisé dans certaines entreprises, notamment l'entreprise « D » qui représente la plus grande entreprise de notre échantillon, et dans l'entreprise « C ». Le processus décrit par l'entreprise « E » et initialement dénommé « Démarche normale technologique » a été assimilé à un processus en cascade, du fait que le processus est clôturé par des tests – voir Figure-A III-7 –, ce qui n'est pas mis en évidence dans le processus Étape-jalon.

Les processus unifiés sont « mentionnés et utilisés » par les entreprises « C » et « J », dont nos interlocuteurs avaient tous deux une expérience professionnelle dans le développement logiciel.

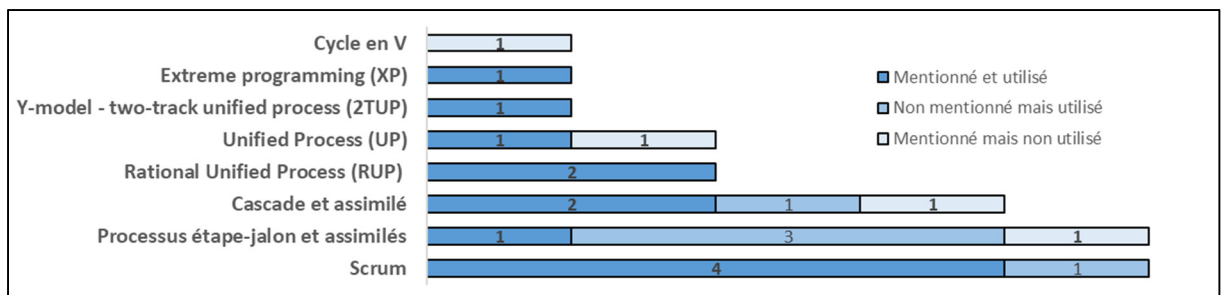


Figure 6.6 Processus mentionnés et utilisés, non mentionnés mais utilisés et mentionnés mais non utilisés par les entreprises

Enfin, le cycle en V, a été « mentionné » par l'entreprise « H », mais aucune entreprise ne semble l'employer. De ce fait, l'approche IS, utilisée par quelques entreprises, manque possiblement de soutien au niveau processus.

La section suivante détaille les méthodes employées par les entreprises de notre échantillon.

6.3.4 Méthodes discutées et/ou employées par les entreprises

Les méthodes sont un ensemble de règles et de pratiques d'ingénierie permettant la réalisation d'une procédure technique. La Figure 6.7 représente la pluralité des méthodes « mentionnées et utilisées », « non mentionnées mais utilisées » et « mentionnées mais non utilisées » pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires.

Il ressort de la Figure 6.7 que les entreprises s'appuient sur une variété de méthodes à faible occurrence pour soutenir leurs activités d'ingénierie. Ces activités d'ingénierie, en fonction de leur champ d'expertise (Tableau 6.1), peuvent être tournées en majorité vers le développement logiciel, ou matériel, ce qui transparait au niveau des méthodes pour certaines entreprises. C'est notamment le cas des entreprises « C », « D », et « J », dont la majorité des méthodes « mentionnées et utilisées » et « non mentionnées mais utilisées » sont tournées vers le développement logiciel. Ces trois entreprises emploient l'ingénierie logicielle orientée réutilisation – *Reuse-oriented software engineering* –, le *Development and Operations* (DevOps) (Jabbari *et al.*, 2016), l'architecture dirigée par les modèles – *model-driven architecture* – et le développement piloté par les tests – *Test-driven development* (TDD). Dans la même lignée, MERISE a été « mentionné et utilisée » comme méthode par l'entreprise « J ». Cependant, MERISE s'avère être plus proche d'un cadre de modélisation que d'une méthode de développement de produits (Le Duigou, 2010).

Certaines entreprises à l'inverse marquent une rupture vis-à-vis de leur champ d'expertise initial. C'est le cas de l'entreprise « G » œuvrant dans le développement et la production d'équipement agricole qui s'est dotée de méthodes tournées vers le développement de « systèmes » à travers la mention et l'usage du MBSE, de la conception basée sur les modèles – *model-based design* –, et de l'ingénierie basée sur les modèles – *model-based engineering*. L'entreprise a ainsi trouvé un avantage à l'utilisation des pratiques basées sur les modèles pour la génération de code permettant de contrôler le comportement du produit.

Entre les entreprises qui emploient des méthodes alignées avec leur champ d'expertise, et celles qui marquent possiblement une rupture, se trouve le reste des entreprises et des méthodes « mentionnées et utilisées » et « non mentionnées mais utilisées ». L'entreprise « A », œuvrant dans l'habillement, s'appuie sur des lignes directrices, les listes de contrôle et la conception modulaire. Les listes de contrôle permettent d'intégrer différentes considérations telles que l'environnement, la production, l'éthique et les aspects réglementaires, ou encore la physiologie du corps humain.

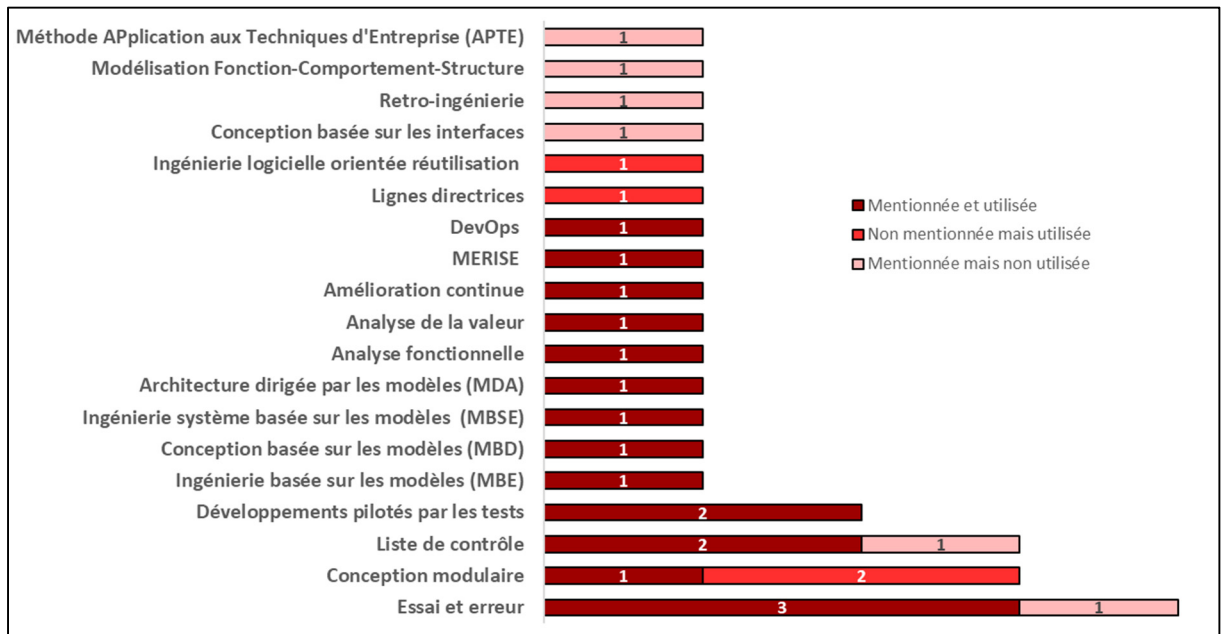


Figure 6.7 Méthodes mentionnées et utilisées, non mentionnées mais utilisées et mentionnées mais non utilisées par les entreprises

Les entreprises « H » et « I », les deux *start-ups* de notre échantillon, intègrent également un développement logiciel important, mais les méthodes « mentionnées et utilisées » ne sont pas nécessairement tournées vers ce dernier. Cela peut s'expliquer par le fait que les participants aux entrevues de ces deux entreprises disposaient d'une expérience majoritairement acquise dans le développement mécanique. En ce sens, par l'expérience professionnelle passée de notre interlocuteur en lien avec l'ingénierie mécanique, l'entreprise « H » s'appuie sur l'analyse

fonctionnelle et l'analyse de la valeur. Ces deux méthodes teintées d'ingénierie mécanique sont complétées par du développement piloté par les tests, et des listes de contrôle pour répertorier les livrables du projet, mais aussi pour la gestion des risques. L'entreprise « I » quant à elle s'appuie sur l'amélioration continue, l'essai et erreur et la conception modulaire.

Ces deux dernières méthodes sont les plus discutées et employées. La conception modulaire est utilisée pour gérer de multiples configurations dans les entreprises « G » et « I », tandis que l'essai et erreur est perçu comme une méthode pour acquérir des connaissances via une expérimentation. Pour les entreprises « F » et « I », ce sont de courtes itérations pour déterminer si une solution est viable ou non. Pour l'entreprise « E », l'essai et erreur est employé pour certains tests, notamment les tests de compatibilité Bluetooth.

Enfin, l'entreprise « H » a fait mention de la méthode APTE, qui peut être utilisée pour conduire une analyse fonctionnelle. Le modèle fonction-comportement-structure – *Function-Behavior-Structure* –, ou encore la conception basée sur les interfaces ont également été mentionnés par l'entreprise « H ». La rétro-ingénierie a quant à elle été employée par l'entreprise « G » dans un cadre d'apprentissage et non de développement, pour s'exercer au MBSE et à la modélisation système.

Certaines de ces méthodes s'appuient sur des outils afin de réaliser des tâches circonscrites. C'est notamment le cas du MBSE ou de l'architecture dirigée par les modèles qui peuvent s'appuyer sur les techniques de modélisation système.

6.3.5 Outils discutés et/ou employés par les entreprises

Les outils interviennent dans un but défini et à un moment précis du développement d'un produit pour obtenir et/ou améliorer un résultat en agissant sur un élément particulier. La Figure 6.8 énumère les outils « mentionnés et utilisés », « non mentionnés mais utilisés » et « mentionnés mais non utilisés » au sein de l'échantillon d'entreprises.

Parmi les outils les plus « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés », on retrouve les *sprints* et les techniques de modélisation système. Les *sprints* sont l'un des outils qui soutiennent directement la mise en œuvre de Scrum et, pour certains interlocuteurs, de l'approche Agile. Dans le cadre de l'approche Agile, l'usage des *sprints* est complété par les *backlogs* et *user stories*, toutefois avec un usage plus restreint. À noter que, bien que plusieurs entreprises emploient Scrum comme processus (4 « mentionné et utilisé » et 1 « non mentionné mais utilisé »), seulement 3 semblent l'appuyer par l'usage de *sprints*. Les techniques de modélisation système semblent aussi répandues que les *sprints*, cependant une majeure partie de cet usage reste interprété. À noter qu'une part importante des entreprises qui « mentionnent et utilisent » ou qui « ne mentionnent pas mais qui utilisent » des techniques de modélisation système incluent du développement logiciel en interne. Par ailleurs, les techniques de modélisation système et la gestion des exigences s'inscrivent dans l'approche IS. Ainsi, là où le niveau méthode, tel que formalisé, ne semblait pas toujours en phase avec les approches employées, le niveau outil est davantage en lien avec elles. Ce lien peut se retrouver sur la Figure 6.4 de la section 6.3.1.

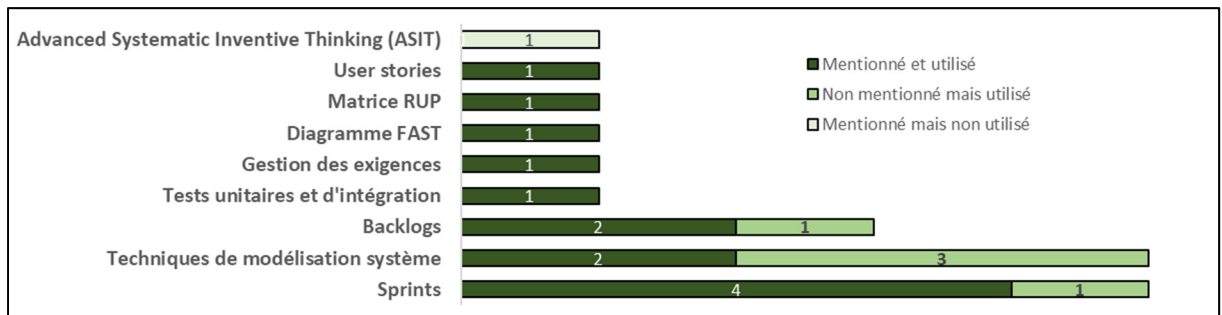


Figure 6.8 Outils mentionnés et utilisés, non mentionnés mais utilisés et mentionnés mais non utilisés par les entreprises

Parmi les outils complémentaires, la matrice RUP, le diagramme FAST, ainsi que les tests unitaires et d'intégration sont également « mentionnés et outils » dans de faibles proportions. Enfin, l'*Advanced Systematic Inventive Thinking* (ASIT), outil de la Théorie de Résolution des

Problèmes Inventifs et généralement abrégé TRIZ, est « mentionné mais non utilisé », et figure comme l'unique outil dédié à l'innovation.

Cette section 6.3 a fait état des concepts et techniques discutés et/ou employés, ainsi que des structurations adoptées par les entreprises pour mener leur développement de produits multidisciplinaires. Cette analyse est une « photographie » prise à l'instant de l'entrevue dans les différentes entreprises. La section suivante aborde le thème qui s'intéresse aux sélections et adaptations conduites qui ont permis aux entreprises d'arriver à cette « photographie ».

6.4 Résultats de l'étude : sélection et adaptation des concepts et techniques

Quatrième et dernier des thèmes, la « **sélection et l'adaptation des concepts et techniques** » cherche à identifier et analyser les facteurs et les critères associés qui ont permis aux entreprises de converger vers les cartographies précédemment introduites – Figure 6.4. La sélection et l'adaptation dans un contexte de développement de produits multidisciplinaires ont été peu documentées au sein de la littérature scientifique, tel que décrit au chapitre 3. Au cours de ce même chapitre, nous retenions cependant que plusieurs termes ont été employés pour décrire le changement de pratiques tels que l'**adoption** (Nijssen et Frambach, 2000 ; Thia *et al.*, 2005 ; Stetter et Lindemann, 2005), la **sélection** (Thia *et al.*, 2005 ; Albers *et al.*, 2014 ; Wilmsen, Dühr et Albers, 2019 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; López-Mesa, 2003), ou encore l'**adaptation** (Wilmsen, Dühr et Albers, 2019), et l'**acquisition** (Araujo Jr., 2001). Dans le cadre de cette analyse, les termes de « sélection » et « adaptation » ont été choisis et définis afin de représenter les phénomènes observés. Une différence a ainsi été faite entre les entreprises qui ont adapté leurs concepts et techniques, et parfois la structure de développement pour faire face à un changement, et celles qui réalisent une sélection parmi une liste de concepts et techniques. Pour rappel, Stetter et Lindemann (2005) considéraient l'adaptation comme une modification de certaines caractéristiques de la méthode ou de l'outil pour favoriser son adoption. Dans le cadre de cette analyse, la définition a été élargie pour prendre également en considération les modifications mineures ou majeures sur les concepts et techniques, et sur la

structure de développement. Pour les modifications mineures, cela peut prendre la forme de l'ajout d'une étape dans le processus, de l'ajout de nouvelles lignes directrices ou encore de nouveaux éléments dans les listes de contrôle. Une modification majeure se traduit par l'ajout de nouveaux concepts ou techniques. La sélection, dans le cadre de cette analyse, implique quant à elle une évaluation pour chaque projet de la pertinence des concepts et techniques à employer. En conséquence, les concepts et techniques employés peuvent varier à chaque projet.

Pour cette analyse, synthétisée par la Figure 6.9, nous avons aussi réalisé une distinction entre les « facteurs » et les « critères ». Les facteurs sont les éléments d'influence qui ont motivé une adaptation ou piloté une sélection. Ils peuvent être multiples et combinés. Nous les avons catégorisés entre les facteurs internes et les facteurs externes. Cette catégorisation peut être retrouvée dans les travaux de Thia *et al.* (2005) ou encore ceux de Araujo Jr. (2001), et peut également trouver un parallèle avec les travaux de Wilmsen *et al.* (2019). Chacune de ces catégories est précisée par les facteurs influents, tel que représenté sur la Figure 6.9. Ces derniers cherchent ainsi à traduire la manière dont le changement a été apporté au sein de l'entreprise.

Les facteurs internes regroupent les facteurs influents directement en lien avec le développement et dont la maîtrise revient à l'entreprise. Cela inclut, de manière non exhaustive, les « caractéristiques du produit », les « disciplines » et les « équipes ». Le facteur influent « équipe » représente une modification motivée par un changement organisationnel au niveau des équipes (composition et organisation). Le facteur influent « disciplines » traduit un changement dans la manière de travailler basée sur l'intégration de nouvelles disciplines. Pour le facteur influent « caractéristiques du produit », le changement conduit vise l'obtention d'une caractéristique du produit.

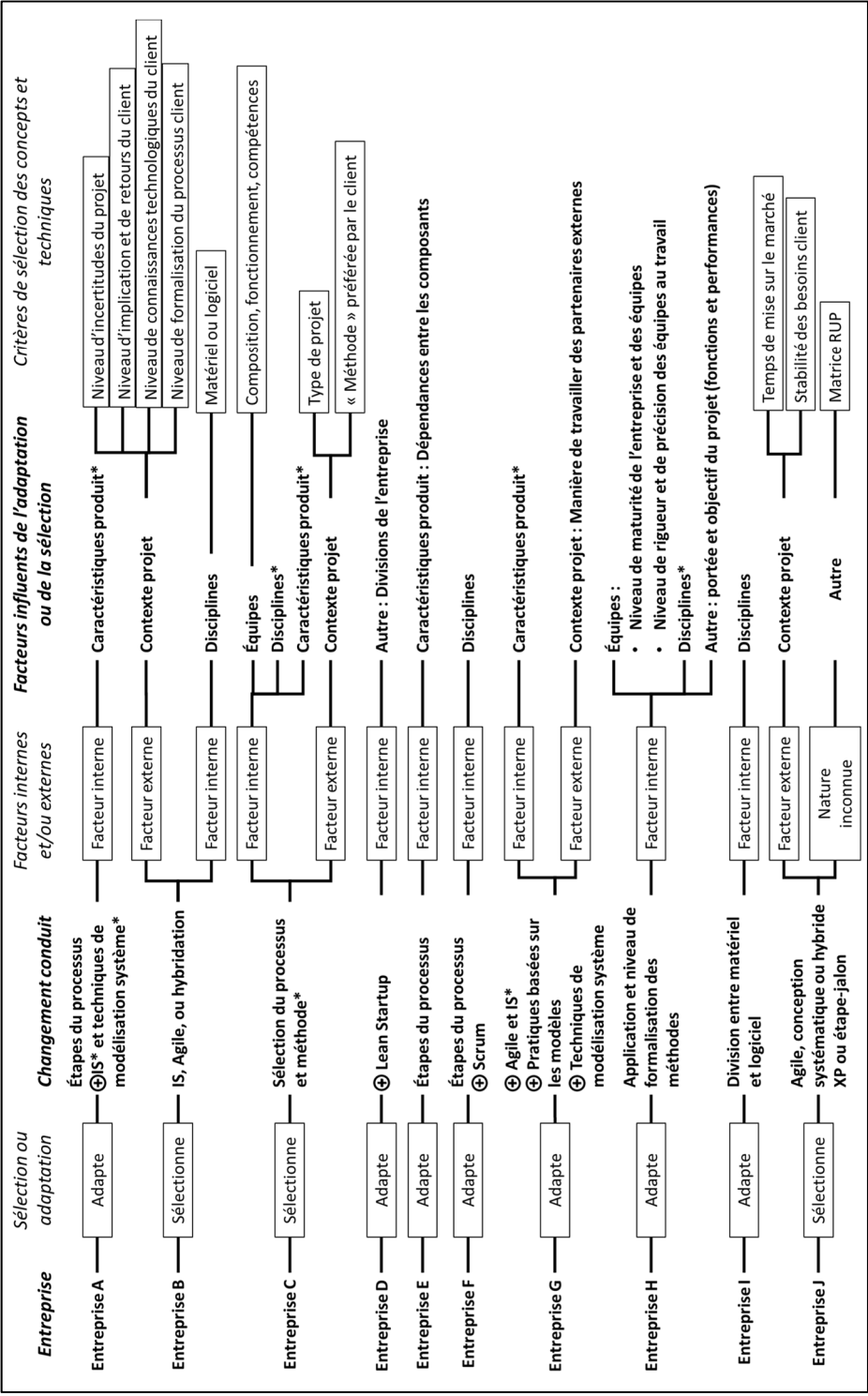


Figure 6.9 Sélection et adaptation des concepts et techniques conduites par les entreprises de l'échantillon

Les facteurs externes regroupent des éléments qui ne sont pas sous le contrôle de l'entreprise, ce qui inclut par exemple des éléments sous le contrôle d'un client, ou sous l'influence de tierces parties. Ils regroupent ainsi ce qui a trait à l'environnement du projet, majoritairement sous le facteur influent dénommé « contexte projet ». Enfin, le facteur influent « autre » permet de mentionner d'autres facteurs influents qui ne sont pas couverts par les autres catégories. Les « critères » sont quant à eux spécifiques à la sélection et viennent préciser les facteurs influents.

Les résultats de l'analyse des entreprises sont consignés dans la Figure 6.9, et sont discutés dans les sections suivantes. Pour chaque entreprise la Figure 6.9 indique si une sélection ou une adaptation est réalisée, le changement conduit, la nature des facteurs employés (interne/externe), précisés par les facteurs influents, et enfin, pour la sélection, les critères manipulés. Pour les changements conduits, l'ajout de concepts et techniques est identifié par le signe « + ». Enfin, de la même manière que pour les sections précédentes, des interprétations ont pu être effectuées ; ces dernières sont indiquées par un astérisque.

6.4.1 Adaptation des concepts et techniques

Il apparaît qu'une majorité des entreprises interrogées ont conduit des adaptations, cependant à différents niveaux. L'entreprise « E » a privilégié des modifications mineures sur les étapes de son processus, en comparaison de l'entreprise « G » qui a opté pour des changements majeurs avec une nouvelle approche, de nouvelles méthodes et de nouveaux outils. Les paragraphes suivants abordent ces deux cas ainsi que les cas intermédiaires.

L'entreprise « E » s'est interrogée sur son processus, et exécute certaines étapes du développement de manière séquentielle ou en parallèle suivant le niveau d'interdépendance entre les composants (facteur interne : « caractéristiques produit »). D'une manière similaire, l'entreprise « F » s'est questionnée sur l'intégration de la partie logicielle dans ses produits et a adapté son processus en conséquence. La partie matérielle est définie la première et

conditionne la partie logicielle (facteur interne : « disciplines »), laissant supposer un développement encore séquentiel. Cependant, la réflexion semble plus poussée que pour l'entreprise « E », l'interlocuteur ayant envisagé le schéma inverse avec la définition du logiciel puis du matériel. Par ailleurs, l'entreprise semble avoir modifié son processus au niveau de l'ingénierie pour se baser sur Scrum (indiqué par un « + »), présenté comme remplaçant d'un processus Étape-jalon. L'entreprise « A » a adapté son processus afin de tenir compte de l'intégration des composants électroniques pour le développement de vêtements intelligents (facteur interne : « caractéristiques produit »). Le directeur de la R&D semble également aller dans le sens de l'adoption de pratiques complémentaires (indiquées par un « + ») comme l'IS et les techniques de modélisation système.

L'entreprise « D » dispose d'un incubateur d'idées qui représente une division à part de l'entreprise. Là où l'entreprise est majoritairement tournée vers le développement logiciel et les équipements de télécommunications, l'incubateur intègre davantage de développements multidisciplinaires. Cet incubateur repose sur une approche Lean Startup, tandis que le reste des divisions de l'entreprise s'appuient sur un processus en cascade, ou un *framework* Agile. L'adaptation conduite repose donc sur les divisions de l'entreprise, un facteur interne. L'entreprise « I » fait également usage de l'approche Agile pour ses développements logiciels. Selon notre compréhension, bien que sa création soit récente au moment de l'entrevue, l'entreprise « I », une *start-up* œuvrant dans les objets connectés, semble adapter ses pratiques en interne. L'adaptation s'appuie sur les disciplines, avec deux manières de travailler entre la partie logicielle et matérielle qui reposent sur des concepts et techniques distincts (facteur interne : « disciplines »). Enfin, un de nos répondants au sein de l'entreprise « G » nous a confié « The company did not know how to develop a product like that » (en référence à un équipement agricole intelligent et connecté). En conséquence, poussée par l'évolution de leur produit et de ses nouvelles caractéristiques, l'entreprise « G » s'est orientée vers Agile et a développé un fort intérêt pour les pratiques basées sur les modèles et les techniques de modélisation système, tournées vers une logique d'IS (indiquées par un « + »). Cette motivation pour le changement de leurs pratiques vient également du fait qu'un de nos

interlocuteurs souligne la difficulté de collaborer sans une architecture commune et un langage pour construire cette architecture. Par ailleurs, l'adoption de ces nouvelles pratiques, et notamment celles en lien avec les techniques de modélisation système et les pratiques basées sur les modèles, émerge d'une collaboration avec un partenaire externe pour réaliser le développement de l'électronique et logiciel (facteur externe : « contexte projet »).

L'entreprise « H » se distingue des autres entreprises. Cette dernière réalise une adaptation qui porte sur le niveau de formalisation de l'application des méthodes en fonction du cadrage et de l'objectif du projet (fonctions et performances), du « niveau de rigueur et de précision des équipes » dans l'exécution des tâches, ainsi que du niveau de maturité de l'entreprise et des équipes qui s'appuie sur leurs connaissances des méthodes (facteurs internes : « autre » et « équipe »). L'exemple qui a été donné porte sur l'analyse fonctionnelle qui se situe entre, d'un côté une formalisation forte par l'application de la méthode APTE – comme une « recette de cuisine » – et d'un autre côté, une formalisation faible par la maîtrise de la notion de fonction. Cette adaptation des méthodes se place dans une volonté de l'entreprise de gagner en maturité – au sens des modèles de maturité (Paulk *et al.*, 1993) –, à travers la formalisation d'un processus, puis de méthodes et d'outils. L'entreprise « H » était au moment de l'entrevue dans sa transformation progressive des concepts et techniques employés, ainsi que de leur formalisation. Enfin, notre interlocuteur, fort de son expérience dans le secteur automobile et du constat d'échecs passés de l'intégration du logiciel dans ce secteur, intègre la différenciation entre le logiciel et le matériel dans le choix des méthodes, et semble donc se baser sur les disciplines (facteur interne : « disciplines »).

La section suivante aborde la sélection, les facteurs et critères associés.

6.4.2 Sélection des concepts et techniques

Les trois entreprises restantes sélectionnent des concepts et techniques à chaque nouveau projet, pouvant donner lieu à de nouvelles structures de développement. Dans l'échantillon

d'entreprises, la sélection est guidée par des facteurs spécifiés en général par des critères qualitatifs liés au contexte du projet, aux équipes, aux disciplines, et aux caractéristiques du produit. Aucune des entreprises n'a formulé de critères quantitativement. La sélection est opérée au niveau de l'approche pour les entreprises « B » et « J », au niveau processus pour les entreprises « J » et « C », et selon nous au niveau méthode pour l'entreprise « C », malgré la présence d'un seul exemple.

Pour les entreprises qui réalisent une sélection au niveau de l'approche, l'entreprise « B » choisit entre Agile et IS en fonction des principales disciplines impliquées (facteur interne : « disciplines ») sur la base d'une dominante matérielle ou logicielle (incluant développement Web et application mobile). Au-delà des disciplines, des critères ayant trait au contexte du projet sont aussi considérés (facteur externe : « contexte du projet »), tels que le niveau d'incertitude du projet, le niveau d'implications et de retours du client, le niveau de connaissances technologiques du client, ou encore le niveau de formalisation du processus client. Dans certains cas Agile peut donc être écarté, ou combiné avec l'IS, donnant lieu à l'hybridation décrite dans la section précédente.

Dans une optique similaire, l'entreprise « J » effectue sa sélection au niveau de l'approche sur le continuum entre Agile et la conception systématique, donnant également lieu à des hybridations dans certains cas. Cette sélection se base sur des critères liés au contexte du projet (facteur externe : « contexte du projet »), tels que le temps de mise sur le marché (fixé par le client) et la stabilité des besoins client, autrement dit, la probabilité que les besoins exprimés par le client évoluent au cours du projet. Par ailleurs, une sélection est également conduite au niveau du processus et est guidée par la matrice RUP. Si la matrice est complétée en diagonale, le processus Étape-jalon prévaudra. À l'inverse, si toute la matrice est remplie, XP sera privilégié. Cependant, les facteurs guidant le remplissage de la matrice n'ont pas été explicités, et apparaissent dans la Figure 6.9 comme de « nature inconnue ».

L'entreprise « C » réalise selon nous une sélection au niveau processus et au niveau méthode. Les critères mis en œuvre sont relatifs à « l'équipe » (facteur interne), à travers leur composition, leur fonctionnement et leurs compétences. Pour notre interlocuteur, le « contexte de projet » le renseigne également sur ce qu'il va être possible d'appliquer. Le contexte projet est caractérisé par ce qui a été qualifié de « type de projet », et une éventuelle préférence formulée par le client concernant une « méthode » à employer est considérée. Des exemples formulés au cours de l'entrevue ont permis d'en déduire que les « disciplines » et les « caractéristiques du produit » jouaient également un rôle (facteurs internes). Ainsi, pour illustrer une sélection basée sur les « disciplines », l'entreprise privilégie l'usage d'un modèle en cascade – *Waterfall* – pour le développement de circuits imprimés (matériel), tandis que pour la partie logicielle, plusieurs « méthodes » sont applicables et doivent être sélectionnées. Pour illustrer le cas des « caractéristiques du produit », sur le cas d'un microscope sonique, les fonctionnalités étaient utilisables au fur et à mesure de leur développement et devaient donc être testées rapidement, ce qui a conduit à l'usage du développement piloté par les tests comme méthode. Enfin, sur un développement de simulateur aéronautique, il était souhaité une « méthode incrémentale et itérative », le processus RUP a donc été sélectionné, en lien avec une préférence du client.

6.4.3 Synthèse de la sélection et adaptation des concepts et techniques

Il ressort de cette section que toutes les entreprises interrogées adaptent ou sélectionnent des concepts et des techniques. Cependant, la manière dont ces différentes entreprises ont envisagé le changement de leur manière de développer des produits nous interroge sur la profondeur de la réflexion menée par chacune d'entre elles. Certaines ont effectué des modifications mineures, là où d'autres ont eu une réflexion plus approfondie sur les concepts et techniques à adopter ou sur des attentes liées à leur implémentation. Parmi les entreprises dont les réflexions ont attiré notre attention, nous pourrions citer les entreprises « G » et « H » sur l'adoption, ainsi que les trois entreprises qui se basent sur une sélection.

L'entreprise « G » est l'entreprise qui a effectué les modifications les plus profondes et dont la démarche a été motivée, d'une part, par l'absence de connaissances sur la manière de développer ses nouveaux produits et, d'autre part, par la formulation d'attentes (architecture, génération de code, collaboration améliorée, etc.). L'entreprise « H » a démontré une réflexion dépassant le simple choix de concepts ou de techniques, et s'est questionnée sur leur application et leur niveau de formalisation. Sur les entreprises qui proposent une sélection de concepts et techniques, les connaissances mises en œuvre sont à souligner et sont généralement portées par les personnes interrogées. En d'autres termes, la sélection repose en majorité sur des connaissances et des expériences tacites. Par ailleurs, la réflexion menée par ces entreprises peut sembler moins approfondie que ce qui a été observé au sein de l'entreprise « G ».

L'analyse de ce quatrième et dernier thème clôture ce chapitre où des éléments de réponse ont été formulés pour notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**. La section suivante, propose une synthèse de ce chapitre, et des éléments à retenir en vue du chapitre suivant.

6.5 Synthèse de l'étude des pratiques industrielles

Là où le chapitre 5 a permis de répertorier et de cartographier des concepts et techniques recommandés par la littérature scientifique, ce chapitre cherche à documenter comment le développement de produits multidisciplinaires est mené en pratique, en analysant la manière dont le développement de produits multidisciplinaires est abordé par 10 entreprises. La Figure 6.10 synthétise les faits saillants de ce chapitre, permettant de répondre à notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles** – encadré bleu. Les données collectées, représentées par le pictogramme des entrevues à gauche de la figure, ont été organisées en quatre thèmes. Les deux premiers relevant principalement d'une mise en contexte des entreprises et des produits, ils n'ont pas été approfondis au profit des deux derniers que sont « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** » – encadré à fond gris clair supérieur –, et « **sélection et adaptation de concepts et**

techniques » – encadré à fond gris clair inférieur. L’analyse de ces deux thèmes forme le cœur de ce chapitre, représenté par le cadre gris à la bordure pointillée.

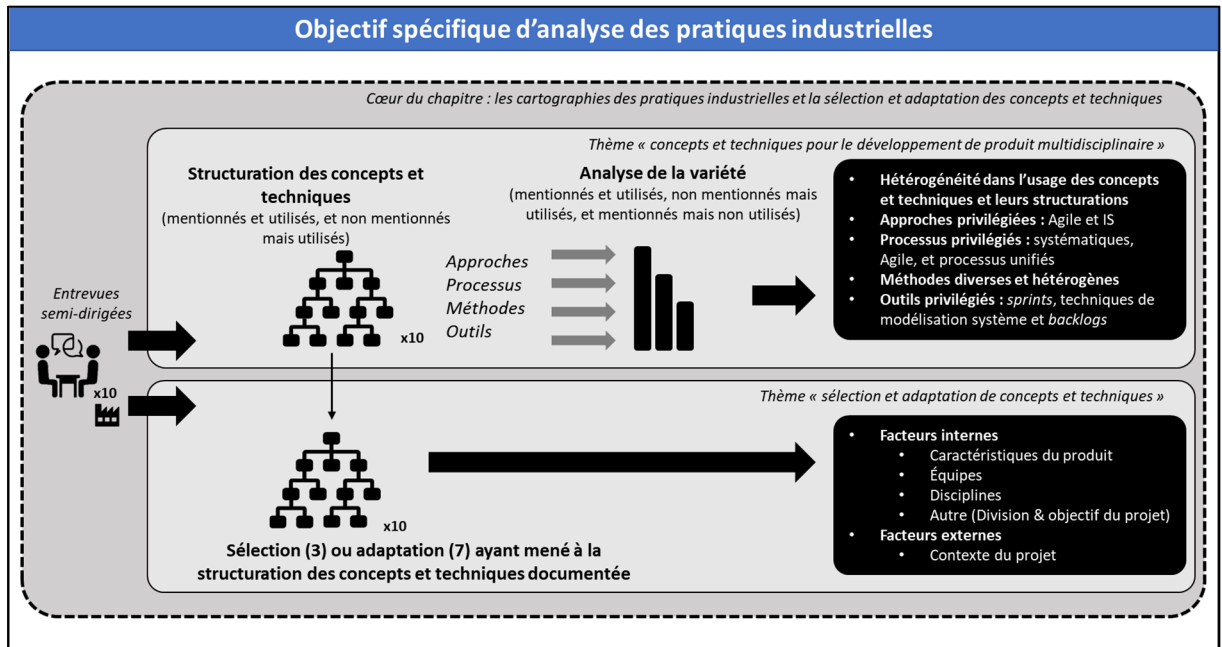


Figure 6.10 Synthèse du chapitre 6 : analyse des pratiques industrielles sur deux thèmes :
« concepts et techniques pour le développement de produits »,
et « sélection et adaptation de concepts et techniques »

Le thème « **concepts et techniques pour le développement de produits multidisciplinaires** » a permis de constituer 10 cartographies représentant la structuration de concepts et techniques « mentionnés et utilisés » et « non mentionnés mais utilisés » par les entreprises. Ces cartographies ont été complétées par une analyse sur chacun des niveaux. Il en ressort une hétérogénéité entre les entreprises tant dans l’usage et la variété des concepts et techniques employés, que dans leurs structurations. En prévision du chapitre 7, cette variété employée, bien que globalement importante sur notre échantillon reste en deçà de celle représentée à travers les cartographies du chapitre 5, notamment lorsque considérée par entreprise. L’analyse de chacun des niveaux a permis de répertorier en plus les concepts et techniques « mentionnés mais non utilisés » qui soulignent des concepts et techniques connus,

mais qui n'ont pas été employés. Il ressort de cette analyse que les approches privilégiées en pratique semblent s'orienter vers Agile, puis IS en deuxième place. À noter que cet ordre a son importance pour le chapitre suivant. Les processus discutés sont essentiellement en lien avec la conception systématique, l'approche Agile, ou encore les processus unifiés. Le cycle en V est évoqué, mais ne semble pas appliqué en pratique. Les méthodes, comme cela a été mentionné, sont diverses, mais l'essai et erreur ainsi que la conception modulaire sont les plus employés et discutés. Enfin parmi les outils privilégiés par les entreprises de notre échantillon, les *sprints*, les techniques de modélisation système et les *backlogs* se distinguent. Ces faits saillants sont regroupés dans l'encadré à fond noir supérieur.

Le thème « **sélection et adaptation de concepts et techniques** » a tenté d'identifier et d'analyser les facteurs ayant dirigé les entreprises vers les structures de concepts et techniques représentées par les cartographies – ce lien avec les cartographies est représenté par la flèche verticale entre les deux encadrés à fond gris clair. Différents facteurs entrent en jeu dans la sélection (menée par 3 entreprises) ou l'adaptation (menée par 7 entreprises), et peuvent être internes ou externes au développement. Ces facteurs sont regroupés dans l'encadré à fond noir inférieur. Parmi les facteurs internes, on retrouve majoritairement les caractéristiques du produit, les disciplines et les équipes. Parmi les facteurs externes, on retrouve essentiellement le contexte du projet.

Les résultats discutés dans ce chapitre, ainsi que ceux du chapitre 5, forment la base de la discussion pour le chapitre 7 qui compare et analyse les similarités et écarts entre les résultats des volets littérature scientifique et pratiques industrielles. Cette comparaison et la discussion associée permettent d'initier une proposition pour l'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs produits.

CHAPITRE 7

COMPARAISON DES VOLETS LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE ET PRATIQUES INDUSTRIELLES

Le CHAPITRE 5 et le CHAPITRE 6 ont permis respectivement de cartographier et d'analyser le développement de produits multidisciplinaires dans la littérature scientifique et au sein des entreprises. Sur la base d'une comparaison entre les cartographies précédemment élaborées, ce chapitre identifie des points de convergence et de divergence, et apporte ainsi des éléments de réponse à notre **objectif spécifique de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles**. Les résultats de cette comparaison, et notamment les manques identifiés au sein des entreprises, sont discutés dans la seconde partie du chapitre. Cette discussion est également alimentée par des éléments de la littérature scientifique introduits au chapitre 3 et a pour vocation d'identifier les lignes directrices d'une démarche d'accompagnement des entreprises.

7.1 Comparaison entre les recommandations de la littérature scientifique et les pratiques industrielles

Avant de réaliser la comparaison entre les volets littérature scientifique et pratiques industrielles, il peut être nécessaire de revenir succinctement sur les éléments de synthèse des chapitres 5 et 6.

Sur le volet littérature scientifique, le chapitre 5 a permis de cartographier une variété importante de concepts et techniques, qui a pu être colligée à travers la cartographie de synthèse. L'**ensemble IS** se démarque car appuyé par de nombreuses références, mais aussi du fait que c'est le seul **ensemble** présent au sein des cartographies. Pour rappel, un **ensemble** est une structure composée d'une approche, d'un processus, d'une méthode et d'un outil. L'approche Agile est également mentionnée et appuyée par différents concepts et techniques

sans pour autant constituer d'**ensemble**. Enfin on note, au sein de la cartographie de synthèse, la présence de différentes techniques ayant trait à une logique fonctionnelle.

Sur le volet pratiques industrielles, le chapitre 6 a souligné une certaine hétérogénéité dans l'usage et la structuration des concepts et techniques entre les différentes entreprises. Sur la question de la sélection et l'adaptation de concepts et techniques, les entreprises se basent *a minima* sur un facteur interne, et toutes les entreprises ont fait évoluer leurs concepts et techniques à différents niveaux et avec une réflexion plus ou moins poussée, toutefois sans qu'il ne semble y avoir de démarche formalisée pour accompagner ce changement.

Sur la base de ces cartographies, les prochains paragraphes visent à mettre en lumière les similitudes et écarts, d'abord d'une perspective globale, puis par niveau. Afin de faciliter la comparaison, la Figure 7.1 reprend les cartographies des pratiques industrielles présentées au chapitre précédent sur lesquelles les éléments en communs avec la cartographie de synthèse ont été identifiés en gras. La cartographie de synthèse a été privilégiée aux cartographies individuelles de chaque type de produit, car les entreprises ne réalisent pas nécessairement une distinction entre mécatronique, SCP et produits intelligents.

À travers la Figure 7.1, il est possible d'observer que les industriels de notre échantillon expriment individuellement une variété réduite de concepts et techniques par rapport à ce qui est représenté dans les cartographies de la littérature scientifique, notamment sur le niveau méthode et d'une manière encore plus marquée sur le niveau outil. On note toutefois quelques similarités dans les pans de structure utilisés. Les entreprises « A », « B », « G », « H » et « J » reprennent ainsi des éléments de structuration de l'**ensemble** IS, par l'association entre au moins deux concepts et techniques. D'une manière similaire, les entreprises « D » et « G » tendent à structurer des concepts et techniques de l'approche Agile. Quant aux entreprises qui ont été qualifiées de plus avancées du point de vue de la structuration au chapitre 6, soit « D », « G » et « J », elles disposent d'éléments de structures, d'approches et de processus sans toutefois formaliser une structure interreliant quatre niveaux, et restent en deçà en termes de

variété de méthodes et d'outils et de leurs possibles agencements. Ainsi, là où le chapitre 6 a attiré l'attention sur une hétérogénéité entre les entreprises dans la structuration et dans la variété des concepts et techniques mis en œuvre, nous soulignons ici le manque de variété et de structuration vis-à-vis de la littérature scientifique. Sur le même schéma que le chapitre 6, une analyse par niveau est conduite et présentée ci-dessous.

Le niveau approche

D'une manière plus spécifique, le niveau approche de la Figure 7.1 offre plusieurs similitudes avec nos cartographies de la littérature scientifique. Si l'on se réfère uniquement à la cartographie de synthèse, l'approche Agile, ainsi que l'IS et l'Éco-conception sont communes, et identifiées en gras sur la Figure 7.1. Si l'on élargit aux cartographies de la littérature scientifique des trois types de produits, le développement de produits Lean (LPD), ainsi que Lean Startup sont discutés respectivement dans la littérature du développement de produits intelligents et mécatronique. Cependant, une première divergence pourrait résider dans le fait que l'IS est bien moins représentée qu'Agile en pratique, à l'inverse de nos cartographies où le recours à l'IS semble fortement se démarquer. Enfin, l'entreprise « J », emploie l'approche systématique – *Plan-driven - Systematic design* – qui peut être retrouvée au sein de nos cartographies de la littérature scientifique, bien qu'elle n'ait pas été expressément mentionnée pour le développement de produits multidisciplinaires par la littérature scientifique.

Le niveau processus

Au niveau processus, la principale divergence avec la littérature scientifique émerge de l'absence du cycle en V qui apparaît comme un élément de structure important au sein de la cartographie de synthèse. Cette absence se fait au bénéfice de processus moins discutés au sein de la littérature scientifique, que sont Scrum, XP et Étape-jalon, mais qui demeurent toutefois présents dans la cartographie de synthèse. D'une manière similaire aux approches, si l'on reconsidère l'intégralité de nos cartographies de la littérature scientifique, le processus en cascade, un type de processus systématique, est discuté pour le développement mécatronique. Par ailleurs, il s'avère que plusieurs entreprises emploient des processus qui s'inscrivent dans

l'approche systématique – *Plan-driven - Systematic design*. Ces processus sont marqués d'un rectangle vert. Cela contraste par rapport aux cartographies de la littérature scientifique, où, bien que présents, les processus systématiques sont peu mis de l'avant. Enfin, les processus « unifiés » que sont RUP, UP et 2TUP n'apparaissent pas dans nos cartographies de la littérature scientifique, bien qu'ils soient employés au sein des entreprises « C » et « J », dont les interlocuteurs ont une forte expérience en développement logiciel.

Le niveau méthode

Le niveau méthode des cartographies des pratiques industrielles bénéficie globalement d'une diversité, qui reste toutefois limitée lorsque considérée par entreprise. Des similarités avec la cartographie de synthèse peuvent être identifiées, telles que la conception modulaire, l'analyse fonctionnelle, la réutilisation dans l'ingénierie logicielle, ou encore les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles. De la même manière que pour le reste des concepts et techniques en lien avec l'IS, les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles demeurent sous-représentées au sein de notre échantillon. Cela permet d'identifier une opportunité d'amélioration dans les structures de développement des entreprises « A », « B » et « H » qui pourraient bénéficier de ces pratiques pour la mise en œuvre de l'IS et pour mieux exploiter les techniques de modélisation système. De la même manière, les structures en lien avec l'approche Agile bénéficieraient de méthodes, mais les cartographies de la littérature scientifique pèchent également sur cet aspect. Sur les similarités, en élargissant à l'intégralité des cartographies, les listes de contrôle, ainsi que les lignes directrices sont discutées pour le développement mécatronique. Le développement piloté par les tests est quant à lui discuté pour le développement des SCP. On note également la présence de plusieurs méthodes employées par les entreprises qui ne sont pas présentes au sein de nos cartographies, mais dont l'usage peut être rapproché ou rattaché à des concepts et techniques discutés pour le développement de produits multidisciplinaires. Il s'agit de l'amélioration continue, de l'essai et erreur, de DevOps, et de l'analyse de la valeur. Selon nous, l'amélioration continue peut-être perçue comme la méthode encadrant le PDCA - roue de Deming, présente sur la cartographie de synthèse. De même, selon nous, l'analyse de la valeur, employée par l'entreprise « H », peut

s'appuyer sur l'analyse fonctionnelle, ou encore le diagramme FAST. Ces derniers sont tous deux présents sur la cartographie de synthèse et employés par l'entreprise « H ». Toutefois, sur la cartographie de l'entreprise « H », l'analyse de la valeur n'est pas liée avec eux, car non expressément associée par notre interlocuteur. L'essai et erreur, bien que nous apparaissant à première vue comme peu « méthodologique », peut être rapproché de certains blocs de la cartographie de synthèse, notamment du prototypage physique, ou encore se rapprocher de ce que nous pourrions qualifier de « sprints de prototypage ». Concernant DevOps, son usage semble essentiellement circonscrit au développement logiciel et s'inscrit, selon notre compréhension, dans l'approche Agile. Néanmoins, les travaux spécialisés sur Agile pour le développement mécatronique, portés par Goevert, Brombeiss et Lindemann (2019), Goevert et Lindemann (2018) et Goevert *et al.* (2019) ne l'explorent pas.

Le niveau outil

De la même manière qu'au niveau précédent, on observe peu de variété au sein des outils exprimés par chaque entreprise. On souligne toutefois la présence d'outils communs avec la cartographie de synthèse, que sont les techniques de modélisation système, le diagramme FAST et les trois outils en lien avec l'approche Agile, soit les *user stories*, les *backlogs* et les *sprints*. En termes de structure, les entreprises « A », « B », « H » et « I » semblent « court-circuiter » les niveaux processus et méthode, pour lier l'approche à l'outil, ce qui permet d'entrevoir des opportunités dans l'amélioration de la structure de développement. De la même manière que sur les niveaux précédents, on note aussi la présence d'outils qui n'apparaissent pas dans les cartographies de la littérature scientifique. C'est le cas de la matrice RUP, des tests unitaires et d'intégration ou encore de la gestion des exigences. Certains de ces outils sont internalisés à des concepts et techniques au sein de la cartographie de synthèse. Les tests unitaires et d'intégration peuvent par exemple être rencontrés au sein de la branche remontante du cycle en V, de même que la gestion des exigences est internalisée à l'IS et partagée avec le cycle en V, où une traçabilité doit être réalisée sur la branche descendante. Ces deux outils ne détonnent donc pas avec les concepts et techniques de nos cartographies. À l'inverse, la matrice

RUP, au même titre que la famille des processus « unifiés », ne trouve pas d'équivalent au sein de nos cartographies de la littérature scientifique.

En résumé, bien que certaines similitudes puissent être observées dans la présence des concepts et techniques, des divergences subsistent entre les concepts et techniques abordés par la littérature scientifique et les pratiques industrielles. Ces divergences peuvent être observées dans les deux sens, avec dans un sens DevOps, l'analyse de la valeur, ou encore des processus « unifiés » qui sont absents de nos cartographies de la littérature scientifique. Dans l'autre sens, les possibles consensus de la littérature ne sont pas représentés en pratique. Il apparaît en effet dans l'industrie que l'accent semble être mis sur l'approche Agile et, dans une moindre mesure, son opérationnalisation ; à l'inverse d'un accent mis sur le recours à l'**ensemble** IS et ses constituantes au sein de nos cartographies de la littérature scientifique. L'absence du cycle en V et le manque d'usage de pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles en témoignent, de même que les techniques ayant trait aux fonctions, à leur analyse, leur décomposition et leur modélisation demeurent relativement absentes. Cependant, au-delà du choix de l'approche et de son opérationnalisation, qui peuvent dépendre de différents facteurs, les divergences établies sur la base des cartographies résident principalement dans les structures formalisées et la faible variété de concepts et techniques utilisés par les industriels de notre échantillon, qui traduisent possiblement deux manques. Il convient alors de rappeler en quoi ces deux manques motivent la proposition d'une démarche.

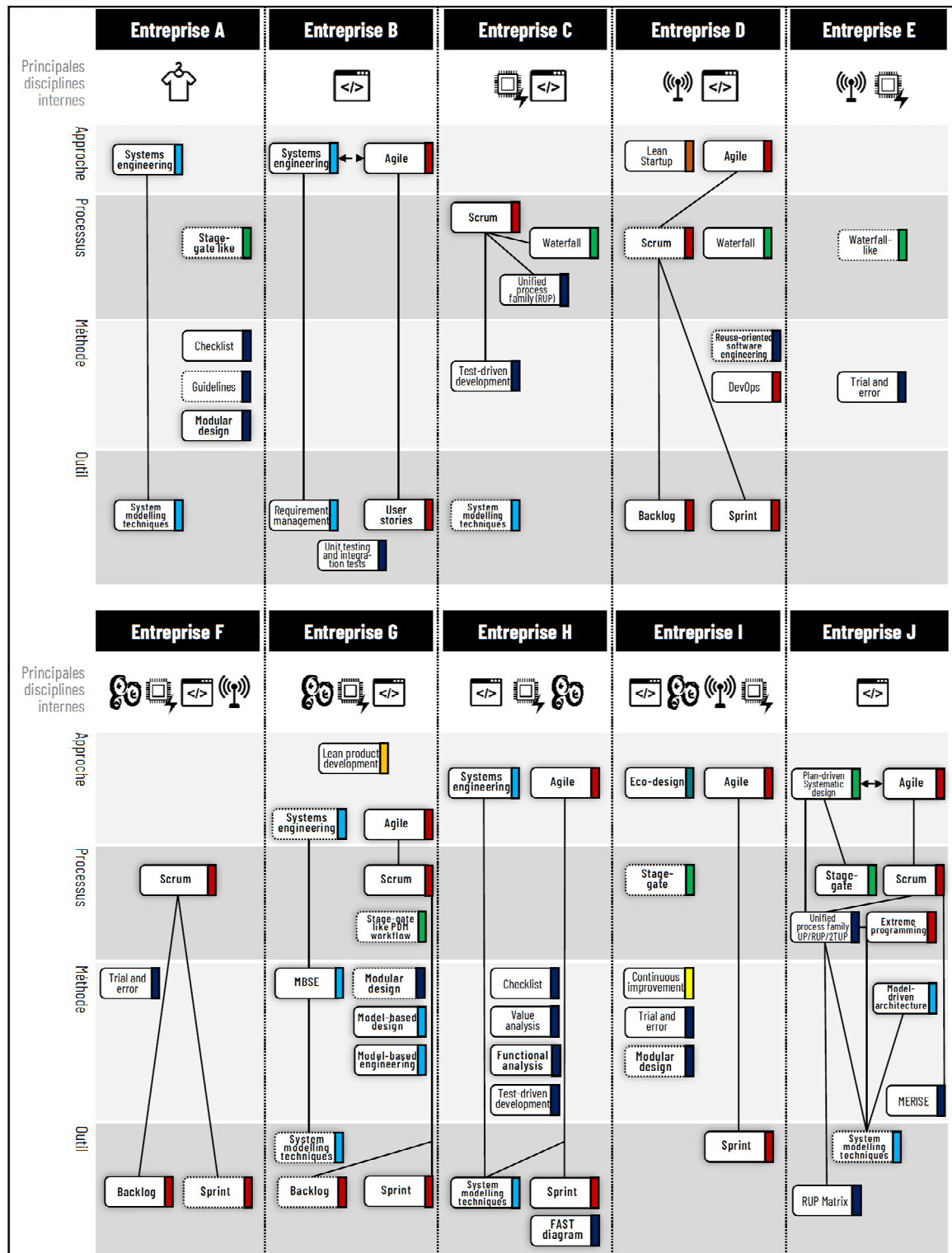


Figure 7.1 Cartographie de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles : entreprises A à J

Comme cela a pu être vu au chapitre 1, l'application des concepts et techniques permet un gain possible dans la performance du développement (Franke *et al.*, 2009 ; Yeh, Pai et Yang, 2010). L'application d'une variété de concepts et techniques permet de répondre à différents défis de développement, et appuyer ainsi les équipes dans le développement du produit (Cagan et Vogel, 2002 ; Albers *et al.*, 2014 ; Gendron *et al.*, 2011 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Lindemann, 2003 ; Nijssen et Frambach, 2000). La variété permet de mieux « outiller » les équipes en couvrant un large spectre de besoins au long du développement. Dans notre contexte d'évolution des produits, certains concepts et techniques peuvent par exemple permettre d'accompagner de manière méthodique l'augmentation de la complexité du produit.

L'accroissement de cette variété va de pair avec une meilleure structuration. La structuration permet ainsi de mieux organiser l'usage des concepts et techniques au long du développement et de s'assurer de la complémentarité entre les concepts et techniques sur nos quatre niveaux. La structuration mène ainsi à l'obtention d'une cohérence générale dans l'exécution du développement, pouvant se traduire *in fine* par une amélioration du développement. En ce sens, ces deux manques apparaissent comme des opportunités d'amélioration du développement de produits et sont discutés à la section suivante.

7.2 Lignes directrices pour l'élaboration d'une démarche d'accompagnement

La section précédente a rappelé le rôle d'une variété et d'une structuration plus importante dans l'amélioration du développement, toutes deux apparemment manquantes au sein des entreprises. Afin d'y répondre, cette section vise à introduire les lignes directrices menant à l'élaboration de notre démarche. Des éléments de la littérature scientifique retenus au chapitre 3 sont repris et leurs apports au sein de notre démarche sont précisés.

En premier lieu, il convient de souligner en quoi la proposition d'une démarche d'accompagnement représente un apport pour les entreprises. Au chapitre 6, nous avons pu observer que la sélection et l'adaptation de nouvelles pratiques ne semblent pas s'appuyer sur

une démarche méthodologique formalisée. Ainsi, bien que certaines entreprises aient mené une réflexion quant à la mise en œuvre de nouvelles pratiques, les deux manques relevés demeurent présents. Cette absence de formalisation d'une démarche a été constatée par différents auteurs, tels que Goevert *et al.* (2019), Hollauer *et al.* (2016) ou encore Feldmüller (2018). L'accompagnement de la transformation du développement des entreprises bénéficierait en ce sens d'une démarche méthodique pour l'implémentation de nouveaux concepts et techniques, couvrant leur sélection et leur adoption.

Pour établir la démarche d'accompagnement et identifier ses principales constituantes, il est possible de se tourner vers les travaux de Stetter et Lindemann (2005), discutés au chapitre 3, dont la démarche générique fait référence à d'autres travaux de la littérature pour soutenir ses différentes étapes. Le fil directeur de notre démarche s'appuie sur le phasage proposé par ces chercheurs, et un parallèle est établi lors de la présentation des étapes de la démarche au chapitre suivant.

Afin de soutenir la sélection, différents auteurs, introduits au chapitre 3, soulignent le besoin de constituer une base de concepts et techniques (Birkhofer *et al.*, 2002 ; Braun et Lindemann, 2003 ; López-Mesa, 2003 ; Buchert *et al.*, 2017 ; Goevert et Lindemann, 2018). Brinkkemper (1996) s'appuie à ce titre sur une base de « méthodes » pour en extraire des « fragments » afin de les assembler pour créer des « méthodes situationnelles ». Il est ainsi possible d'établir un parallèle avec nos travaux. La base de « méthodes » est alors représentée par nos cartographies de la littérature scientifique qui rassemblent des structures ou pans de structure documentés. Les fragments sont les concepts et techniques considérés individuellement avec leurs liens, qui peuvent être assemblés pour générer une nouvelle structure ou enrichir/compléter une structure de développement existante.

Brinkkemper (1996) s'appuie également sur une caractérisation et une analyse du contexte interne et externe de l'entreprise et de son développement de produits. Cette analyse semble alignée avec nos observations du chapitre 6 qui ont démontré que les entreprises adaptent ou

sélectionnent de nouveaux concepts et techniques sur la base de facteurs internes, parfois complétés par l'ajout de facteurs externes. Cette catégorisation entre facteurs internes et externes peut trouver un parallèle avec les travaux de différents chercheurs (Thia *et al.*, 2005 ; Araujo Jr., 2001 ; Chai et Xin, 2006 ; Nijssen et Frambach, 2000 ; Wilmsen, Dühr et Albers, 2019). Dans le cadre de notre démarche, la prise en considération du contexte interne et externe de l'entreprise et de son développement de produits est reprise et réalisée par le biais de facteurs.

D'autres éléments sont également venus alimenter cette réflexion autour d'une démarche d'accompagnement. Au chapitre 3, nous avons souligné que différents chercheurs débutent leur démarche par l'identification d'un besoin ou d'un problème (Araujo Jr., 2001 ; López-Mesa, 2003 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Braun et Lindemann, 2003), que nous regroupons sous la terminologie de « défis ». Cette identification des défis liés au développement est aussi réalisée par les entreprises qui ont pu en exprimer lors des entrevues. Par exemple, lors de notre entrevue avec l'entreprise « I », notre interlocuteur nous avait confié des défis en lien avec l'accomplissement d'un « design orienté utilisateur », de « comment s'assurer de plaire aux clients », de mieux cerner « quels sont leurs problèmes », et de déterminer « quelles solutions et comment peut-on y répondre ? ». D'une manière plus générale, les entreprises de notre échantillon nous ont partagé des préoccupations environnementales (Entreprises « A » et « I »), d'intégration et de silos (Entreprises « A », « B », « H » et « I »), de collaboration (Entreprises « C », « D » et « J »), de fiabilité et de robustesse des produits (Entreprises « A », « F » et « G »), ou encore de dépendance vis-à-vis de tierces parties (Entreprises « B », « D », « E », « F », « G »), pour n'en citer que quelques-unes. Les défis peuvent ainsi porter sur l'environnement de développement, le produit, et le développement en lui-même. Nous entrevoyons ainsi une complémentarité entre l'analyse du contexte externe et interne de l'entreprise et du développement, et la formulation des défis. Le corps de la démarche ayant été présenté, les prochains paragraphes discutent de la réponse aux deux manques identifiés.

Le manque de structuration, en plus de nos observations sur la Figure 7.1, a été souligné par différents chercheurs (Albers *et al.*, 2014 ; López-Mesa, 2003). Au sein de la littérature, la recherche de la constitution d'une structure de développement en plusieurs niveaux inter reliés, peut être retrouvée chez différents auteurs (Vajna, 2005 ; Goevert et Lindemann, 2018 ; Birkhofer *et al.*, 2002 ; Braun et Lindemann, 2003). Dans le cadre de notre proposition, nous cherchons à répondre à ce manque par la formalisation d'une structure de développement à travers la réalisation de cartographies basées sur le modèle APMO. La réalisation de cartographies intervient au sein de deux étapes de la démarche décrites ci-après.

Premièrement, afin d'établir un point de départ, la réalisation d'une cartographie est employée dans les premières étapes pour représenter les concepts et techniques actuellement utilisés par l'entreprise. Sur la base de cette première cartographie, une comparaison avec les cartographies de la littérature scientifique peut permettre d'identifier les manques et pistes d'amélioration. Deuxièmement, la réalisation d'une cartographie est réemployée pour constituer la nouvelle structure de développement à partir de concepts et techniques sélectionnés au sein de nos cartographies de la littérature scientifique. Pour l'ordre d'élaboration de cette structure, différents auteurs semblent suggérer en premier lieu la définition du processus, puis des méthodes et des outils (Vajna, 2005 ; Nijssen et Frambach, 2000). Cet ordre semble partagé par notre interlocuteur de l'entreprise « H » qui aspire à formaliser leur structure de développement. Par ailleurs, notre modèle APMO intègre une hiérarchie, avec l'approche qui est opérationnalisée par le processus, lui-même appuyé par les méthodes, puis par les outils. Bien que l'ordre inverse puisse être envisagé, nous suggérons de générer la structure en débutant du niveau approche vers le niveau outil. La génération de cette structure nous amène à la question de la sélection en lien avec le manque de variété.

Le manque de variété, en plus de nos observations, a également été constaté par Albers *et al.* (2014), Nijssen et Frambach (2000), ou encore López-Mesa (2003) comme abordé au chapitre 3. Tel que discuté à la fin de la section précédente, l'avantage d'une plus grande variété est de couvrir et d'outiller un large spectre des besoins pouvant survenir au cours du

développement de produits. Les besoins actuellement non répondus peuvent alors être exprimés en termes de défis. Par ailleurs, il est attendu que des défis émergent de l'évolution des produits et du contexte de développement de produits multidisciplinaires. Nous envisageons ainsi la réponse au manque de variété par une sélection reposant sur l'association de ces défis avec des concepts et techniques issus de nos cartographies de la littérature scientifique. Cette association peut également guider les entreprises vers la sélection de structures, ou pans de structures, contribuant simultanément aux deux manques. Enfin, la sélection est conduite en deux temps, le premier afin de répertorier les différents concepts et techniques répondant aux défis, menant à une présélection, qui est affinée dans un second temps par la prise en considération de différents aspects afin de favoriser l'adoption. Pour cela, il est possible de se tourner vers les travaux d'autres chercheurs traitant de l'adoption, dont certains ont été évoqués au chapitre 3 (Thia *et al.*, 2005 ; Albers *et al.*, 2014 ; López-Mesa, 2003 ; Nijssen et Frambach, 2000). Certaines de ces considérations sont rappelées lors de la présentation de la démarche d'accompagnement au chapitre suivant.

En résumé, cette démarche doit ainsi permettre, à travers son exécution, de répondre au manque de variété et de structuration au sein des entreprises, mais également à leurs défis en lien avec le développement de produits. Les principales lignes directrices sur lesquels la démarche proposée se distingue sont synthétisées ci-dessous.

La démarche vise à augmenter la variété et la structuration de concepts et techniques et répondre aux défis de développement de produits multidisciplinaires.

L'**identification** des défis s'appuie sur l'analyse du contexte externe et interne de l'entreprise et de son développement de produits multidisciplinaires.

La **sélection** est opérée au sein de nos cartographies de la littérature scientifique et repose sur l'association de défis et de concepts et de techniques leur apportant une réponse partielle ou totale.

Au sein de la **démarche**, le modèle APMO et le travail de cartographie permettent d'établir la nouvelle structure de développement.

7.3 Synthèse de la comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles

En synthèse, le cœur de ce chapitre, représenté par le cadre gris à la bordure pointillée sur la Figure 7.2, porte sur la réponse à notre **objectif spécifique de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles**. Sur la base des cartographies de la littérature scientifique et des pratiques industrielles, ainsi que des synthèses associées, la comparaison a ainsi permis de mettre en lumière des similarités et des écarts entre les recommandations de la littérature scientifique et la manière dont les industriels développent leurs produits multidisciplinaires. Ces résultats sont symbolisés par les flèches vertes et bleues.

Parmi les observations générales sur les pratiques industrielles, résumées dans la partie haute de l'encadré noir au centre de la Figure 7.2, deux manques principaux sont distingués, soit une faible structuration du développement et une faible variété de concepts et techniques. À cela s'ajoute l'absence d'une démarche formalisée pour accompagner la transformation des pratiques de développement. Il ressort également que la pratique industrielle demeure peu alignée avec les consensus observés dans les cartographies de la littérature scientifique.

Parmi les observations par niveau, détaillées dans la partie basse l'encadré noir au centre de la Figure 7.2, on observe ainsi que l'approche Agile et ses concepts et techniques semblent privilégiés à ceux de l'IS dans la pratique industrielle. On souligne à ce titre l'absence du cycle en V, et un usage restreint des pratiques basées et dirigées par les modèles. À l'inverse, les techniques de modélisation système, faisant partie de l'IS sur nos cartographies de la littérature scientifique, semblent adoptées par plusieurs entreprises.

La discussion de ces éléments en regard de la littérature scientifique évoquée au chapitre 3 a permis d'établir les lignes directrices pour l'élaboration de notre démarche d'accompagnement. Cette démarche est présentée étape par étape au chapitre suivant.

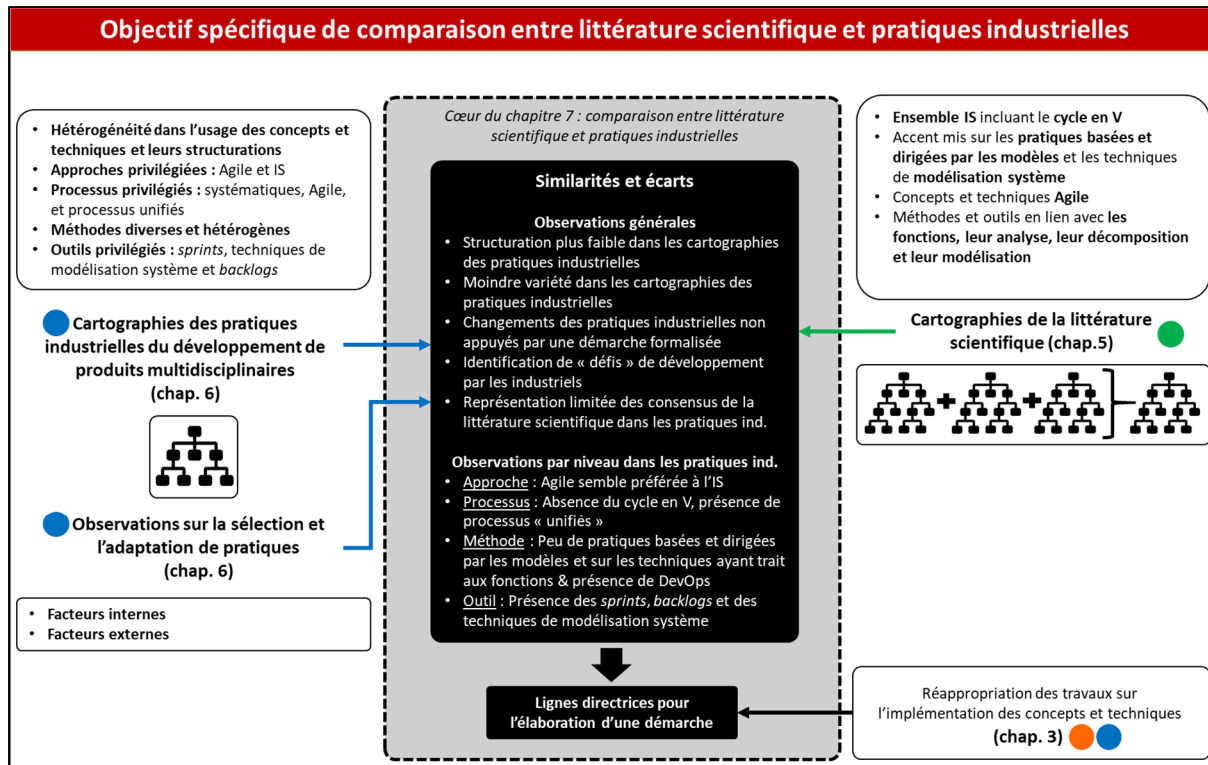


Figure 7.2 Synthèse la comparaison des volets pratiques industrielles et littérature scientifique menant à l'élaboration de la démarche d'accompagnement

CHAPITRE 8

DÉMARCHE POUR L'ACCOMPAGNEMENT DES ENTREPRISES DANS LA GÉNÉRATION D'UNE STRUCTURE DE DÉVELOPPEMENT

Ce chapitre apporte une réponse à notre **objectif principal** à travers la proposition d'une démarche d'accompagnement construite à partir des lignes directrices établies au chapitre précédent. En ce sens, notre démarche traduit la mise en application des connaissances synthétisées tout au long de ce manuscrit et capitalise sur les cartographies de la littérature scientifique. Cette démarche, présentée étape par étape au 8.1, vise à guider les entreprises dans l'élaboration d'une structure de développement et l'implémentation de concepts et techniques en lien avec l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires. Par la suite, la section 8.2 aborde l'évaluation de la démarche proposée.

8.1 Proposition : démarche d'accompagnement

Cette section vise à décrire étape par étape la démarche d'accompagnement dont une partie s'inspire des travaux proposés par Brinkkemper (1996) et de Stetter et Lindemann (2005). Les apports de nos travaux dans cette démarche se positionnent majoritairement sur les étapes 3, 4, 5 et 6 de la Figure 8.1, identifiées par les cases noires. L'étape 3 se base sur le modèle APMO et l'arbre de décision afin de cartographier les concepts et techniques employés par l'entreprise. L'étape 4 identifie les manques et pistes d'améliorations à travers le principe de comparaison issu du chapitre précédent, tandis que les étapes 5 et 6 permettent de sélectionner et structurer des concepts et techniques à partir des cartographies de la littérature scientifique.

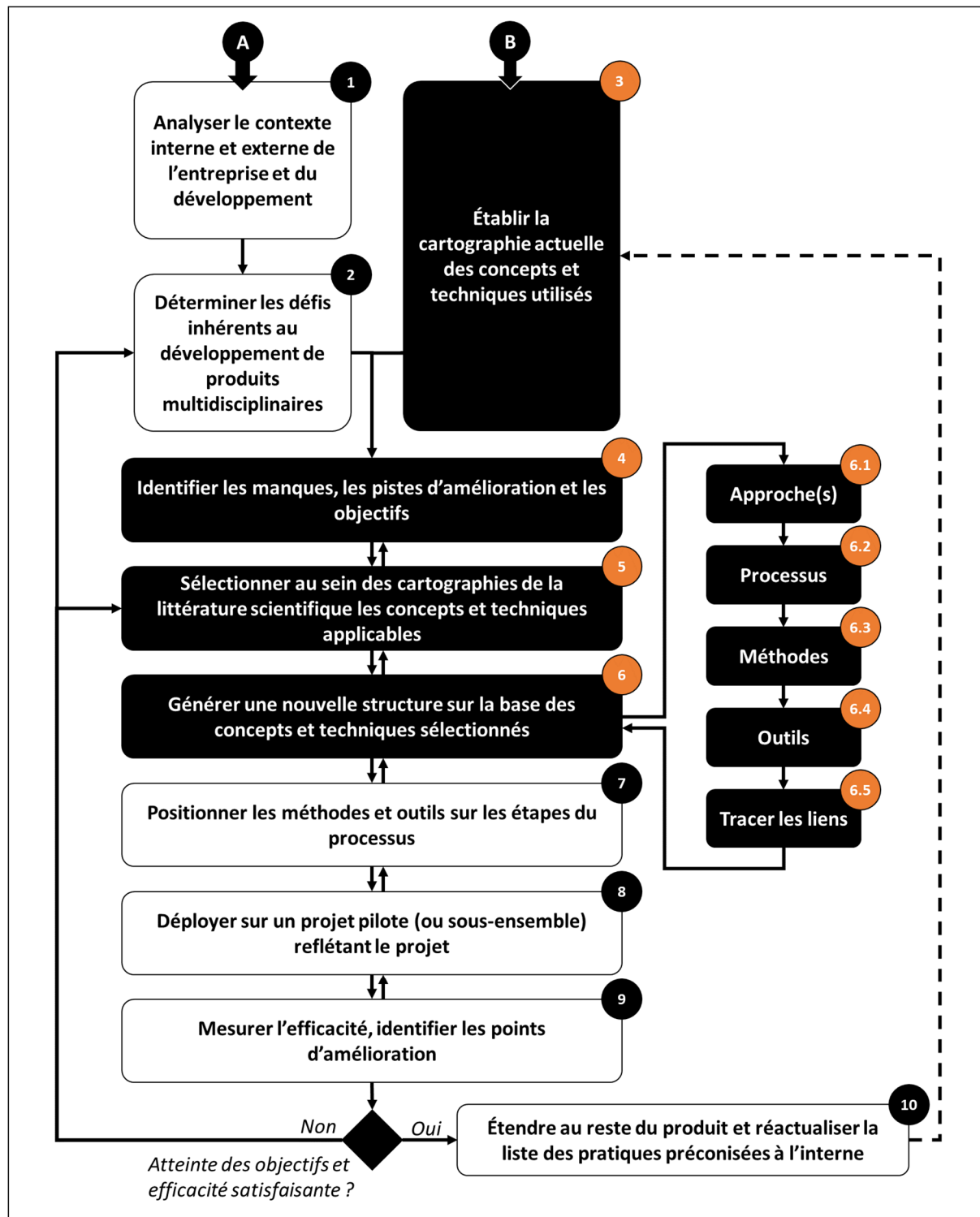


Figure 8.1 Démarche d'accompagnement des entreprises pour la génération d'une structure de développement

Les 10 étapes qui constituent la démarche proposée sont, en grande partie, agencées de manière séquentielle (Figure 8.1). Il demeure toutefois possible d’itérer entre les différentes étapes, tel que suggéré par les flèches bidirectionnelles. On distingue également deux points d’entrée, identifiés par les lettres (A) et (B). Il est alors possible de parcourir la démarche de trois manières différentes : uniquement par le point d’entrée (A), uniquement par le point d’entrée (B), soit par les deux points d’entrée simultanément.

Premièrement, en débutant par le point d’entrée (A), on peut considérer que l’entreprise n’a pas d’antécédent de projets permettant d’établir la cartographie actuelle, par exemple une *start-up* qui souhaiterait formaliser son développement. Ce cas, relativement peu fréquent, ne sera pas abordé dans ces travaux.

Deuxièmement, en débutant par le point d’entrée (B), on peut considérer que l’entreprise souhaite améliorer sa structure de développement, sans nécessairement passer par une analyse des défis. À ce titre, le principe de comparaison entre la cartographie réalisée et les cartographies de la littérature scientifique peut être réemployé pour compléter la structure existante. Par exemple, au chapitre 6, l’entreprise « A » s’appuyait sur l’IS et des techniques de modélisation système et disposait d’un processus Étape-jalon adapté. En s’appuyant sur la cartographie de synthèse, il serait alors possible de compléter la structure existante avec un cycle en V pour remplacer le processus actuel, mais aussi y introduire des pratiques basées sur les modèles. Cette deuxième manière n’est pas traitée dans le cadre de ces travaux.

Enfin, la troisième possibilité est de débiter par (A) et (B). C’est cette option que nous privilégions dans le cadre de nos travaux et qui est détaillée étape par étape au cours des sections suivantes en débutant par le point d’entrée (A), l’étape 1.

8.1.1 Analyser le contexte interne et externe de l'entreprise et du développement

Cette première étape porte sur la caractérisation et l'analyse du contexte interne et externe de l'entreprise et du développement actuel de ses produits. Pour cette analyse, les travaux de Wilmsen, Dühr et Albers (2019), évoqués au chapitre 3, sont particulièrement adaptés pour la caractérisation du contexte du développement de produits. Pour rappel, les catégories « environnement » et « projet de développement », comportant respectivement 150 et 325 facteurs, sont les plus influentes sur le choix des concepts et techniques. Nous percevons cette liste de facteurs comme une liste de contrôle permettant de guider les entreprises dans l'identification des éléments les plus influents en lien avec le développement du produit multidisciplinaire considéré. De par leur nombre important, il peut également être nécessaire de prioriser les facteurs identifiés, par exemple par une pondération, bien que cet aspect ne soit pas couvert par leurs travaux.

Parmi les exemples de **facteurs externes** (catégorie « environnement »), les chercheurs mentionnent les modes de collaboration avec des fournisseurs, les normes et réglementations, les utilisateurs réels du produit, ou encore l'attitude politique envers l'industrie et le produit. Les facteurs considérés peuvent alors être économiques, commerciaux, sociologiques, démographiques, politiques, environnementaux, réglementaires (RoHS par exemple), normatifs ou encore juridiques. Pour les **facteurs internes** (catégorie « projet de développement »), Wilmsen, Dühr et Albers (2019) évoquent le type de produit, sa complexité, son degré d'innovation, la taille de l'équipe, les compétences de cette équipe, ou encore l'implication des utilisateurs. Ces exemples semblent se rapprocher des facteurs évoqués par les entreprises au chapitre 6 tels que la composition des équipes, les disciplines impliquées, ou encore les caractéristiques du produit.

Cette analyse du contexte de l'entreprise et du développement à travers les facteurs internes et externes permet de mettre en lumière des sources de défis potentiels utiles à la prochaine étape.

8.1.2 Déterminer les défis inhérents au développement de produits multidisciplinaires

La formulation de défis est le point de départ de plusieurs démarches présentes au sein de la littérature (Araujo Jr., 2001 ; López-Mesa, 2003 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Braun et Lindemann, 2003) et permet, à notre sens, de conférer un cadre à la démarche. La démarche est alors motivée par la résolution d'une situation jugée insatisfaisante et des défis associés. Cette étape 2 vise à accompagner l'entreprise dans l'identification et la formulation de ses défis en relation avec ses futurs développements de produits multidisciplinaires. Deux manières complémentaires sont proposées pour leur identification et formulation.

La première d'entre elles est d'identifier des défis à partir des facteurs internes et externes retenus à l'étape 1. La seconde manière est complémentaire et emploie diverses techniques de collecte de données afin d'identifier de potentiels défis. Ainsi, il est possible de s'appuyer sur une analyse de documents internes, par exemple le *post-mortem* d'un développement précédent, ou encore, à la manière de l'exemplification présentée au chapitre suivant, de conduire des entrevues semi-dirigées. Par ailleurs, en lien avec la spécificité de nos travaux à travers une structure de développement en quatre niveaux, on rappelle le parallèle possible entre notre modèle APMO et les niveaux stratégiques de l'entreprise. Chacun des niveaux stratégiques peut ainsi formuler des défis afin d'identifier à l'étape 5 les concepts et techniques permettant d'y répondre. Les défis répertoriés peuvent ainsi être en lien avec l'organisation et son environnement, le développement et le produit en lui-même. Certains de ces défis ont été énoncés par les entreprises décrites au chapitre 7.

L'étape suivante s'intéresse au point d'entrée (B) et à la réflexion sur les concepts et techniques actuellement utilisés.

8.1.3 Établir la cartographie actuelle des concepts et techniques utilisés

L'étape 3 trouve un parallèle avec la phase « d'analyse du processus de développement de produits » (Stetter et Lindemann, 2005), mais se distingue par l'emploi du modèle APMO. L'analyse est alors élargie à l'intégralité des quatre niveaux à travers la réalisation d'une cartographie du développement de produits actuels. Cette cartographie est requise afin d'établir un point de départ, et sert de base afin de comparer et d'identifier des manques et pistes d'amélioration par la suite. Ainsi, on amène les entreprises à se questionner sur les principes régissant leur développement (approches), l'organisation générale des étapes du développement (processus), et les méthodes et outils employés, ainsi que la manière dont ces éléments sont agencés. Si des concepts et techniques identifiés ne sont pas déjà classés dans nos cartographies, l'arbre de décision peut être réemployé à cet effet.

Pour identifier la ou les approches mises en jeu, il faut s'interroger sur la stratégie, les principes et la philosophie du développement actuellement en place. L'identification de l'approche peut être une composition de principes de différentes approches. Cela demande donc un certain recul et une vision globale sur le développement de produits. Pour l'identification du processus, il est possible d'énumérer les différentes étapes et essayer de rapprocher l'agencement de ces dernières de modèles de la littérature. Enfin, pour identifier les méthodes et outils, il est possible de répertorier les procédures techniques, les ensembles de règles et de pratiques d'ingénierie, et d'identifier la manière dont les tâches sont conduites pour les différentes disciplines impliquées aux différentes étapes. Cela conduit à réaliser une collecte d'information, et différentes manières de procéder peuvent être envisagées. À ce titre, Stetter et Lindemann (2005) évoquent les entrevues, l'analyse de documents dans le cas où ces informations sont ou peuvent être formalisées, l'observation, ou la tenue d'ateliers.

Une fois le contexte analysé, les défis déterminés et la cartographie représentant l'état initial établie, il est possible d'identifier des manques et pistes d'amélioration. Cette étape est décrite ci-après.

8.1.4 Identifier les manques, les pistes d'amélioration et les objectifs

À la convergence des étapes issues des points d'entrée (A) et (B) se situe l'étape 4 dont l'idée sous-jacente est de souligner ce à quoi la structure de développement actuelle ne permet pas de répondre, mais aussi d'identifier les forces actuelles, en vue de définir le niveau de performance souhaité. Pour faire un parallèle avec Stetter et Lindemann (2005), cette étape 4 intègre les étapes de recherche des inadéquations, d'analyse approfondie des détails, d'identification des forces, du potentiel d'amélioration, et de formulation des objectifs. Par ailleurs, en prévision de la mesure de l'efficacité de l'étape 9, il est nécessaire de définir et de mesurer des indicateurs en lien avec les objectifs en amont des changements. Cette étape intègre donc également des éléments de « l'évaluation de l'incidence » (Stetter et Lindemann, 2005). Ces différents aspects sont décrits ci-après et résumés dans la Figure 8.2.

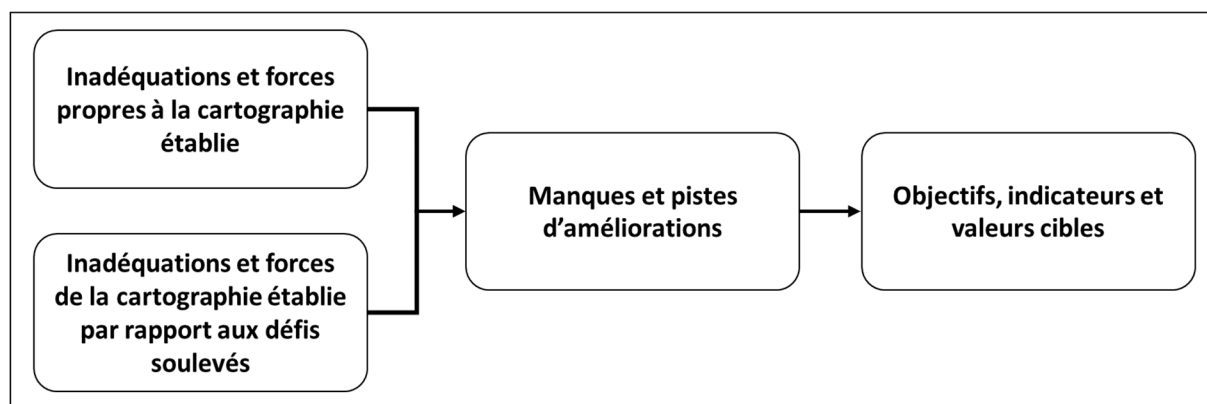


Figure 8.2 Identification des manques et pistes d'amélioration en vue de définir les objectifs, indicateurs et valeurs cibles

Premièrement, en lien avec nos apports, la comparaison entre une cartographie pratique établie et les cartographies de la littérature scientifique peut être mise à contribution afin de relever les inadéquations propres à la cartographie actuelle. Ces inadéquations peuvent ainsi porter sur l'absence d'approche, de processus formalisé, ou encore le manque de variété au sein des méthodes et outils employés. L'analyse de la cartographie peut également révéler un manque de structuration entre les niveaux. Cet aspect est représenté en haut à gauche de la Figure 8.2.

Deuxièmement, cette recherche d'inadéquations doit également se faire vis-à-vis des défis identifiés. On cherche à déterminer dans quelle mesure les concepts et techniques actuels ne permettent pas d'y répondre ou induisent ces derniers. Par exemple, pour un défi formulé en lien avec une organisation encore trop séquentielle et silotée, la pertinence du processus actuellement employé peut être questionnée. De la même manière, pour un défi en lien avec une formulation défailante du besoin client, on veut identifier quels concepts et techniques y répondent actuellement. Cet aspect est représenté en bas à gauche de la Figure 8.2.

Transversalement à ces deux premiers points, l'étape 4 doit également identifier les forces actuelles du développement, qui peuvent résider dans la réponse partielle à un défi ou dans un pan de structure de développement déjà établi et apportant satisfaction. Par exemple, l'entreprise « G » pourrait capitaliser sur les pratiques basées sur les modèles. Il est ainsi nécessaire d'identifier les concepts et techniques devant être conservés, afin d'essayer par la suite de générer une structure de développement autour de ces derniers.

À travers l'identification des inadéquations, il est possible de souligner les éventuelles pistes d'amélioration et manques – représentées au centre de la Figure 8.2 – qui permettent à leur tour de formuler des objectifs auxquels il convient d'attribuer des indicateurs et valeurs cibles permettant d'évaluer leur atteinte, représentés à droite de la Figure 8.2. Ces objectifs et indicateurs transcrivent la performance à atteindre à l'issue de la démarche. Pour la création d'indicateurs, Stetter et Lindemann (2005) renvoient aux travaux de Basili et Rombach sur « la méthodologie GQM » (pour but, question, métrique). Toutefois, il est nécessaire de considérer l'influence du passage des produits « traditionnels » aux produits multidisciplinaires sur les indicateurs et les valeurs cibles. Cet aspect, ainsi que les indicateurs potentiels, sont discutés plus en détail à la section 8.2.

En résumé, l'étape 4 est une étape charnière qui sert à réaliser une synthèse des points d'entrée (A) et (B) en conjuguant deux perspectives complémentaires, permettant de mettre en avant

les forces et les inadéquations au sein de la cartographie actuelle en vue de la sélection, l'étape suivante.

8.1.5 Sélectionner au sein des cartographies de la littérature scientifique les concepts et techniques applicables

L'étape 5 représente le cœur de notre démarche à travers la mise à profit de nos cartographies de la littérature scientifique pour la sélection de concepts et techniques solutionnant partiellement ou totalement les défis identifiés. Nos cartographies de la littérature scientifique agissent alors comme une base de concepts et techniques recommandés pour le développement de produits multidisciplinaires, suivant le principe décrit par Brinkkemper (1996). Cette étape est dénommée « choix et adaptation des méthodes » au sein des travaux de Stetter et Lindemann (2005). La sélection, représentée par la Figure 8.3, est ainsi opérée en deux temps appelés la présélection et l'adoption.

La présélection est guidée par les défis – représentés en haut de la Figure 8.3 – et par leur mise en relation avec des concepts et techniques y apportant une réponse. À noter que la réponse à un défi donné peut s'appuyer sur une composition de concepts et de techniques de différents niveaux, et peut ainsi constituer un pan de structure, ou encore inclure des hybridations. Des alternatives entre les concepts et techniques présélectionnés peuvent également être présentes, et pourront être débattues à l'issue de la présélection. La présélection des concepts et techniques est illustrée au centre de la Figure 8.3 sous la forme d'une spirale qui amène à considérer progressivement une variété plus large de concepts et techniques. Nous suggérons de débiter l'identification des concepts et techniques potentiels au sein de la cartographie de synthèse. Si nécessaire, la sélection peut aussi être étendue aux cartographies des trois types de produits multidisciplinaires, offrant un bassin plus varié de concepts et techniques, toutefois avec un consensus et une structuration possiblement plus faible. Enfin, dans le cas où les défis listés ne trouvent pas de réponse au sein de nos cartographies de la littérature scientifique, la prise en considération d'autres concepts et techniques peut être explorée. La présélection

conduit ainsi à une liste de concepts et techniques qui est affinée par la prise en compte de considérations décrites ci-après.

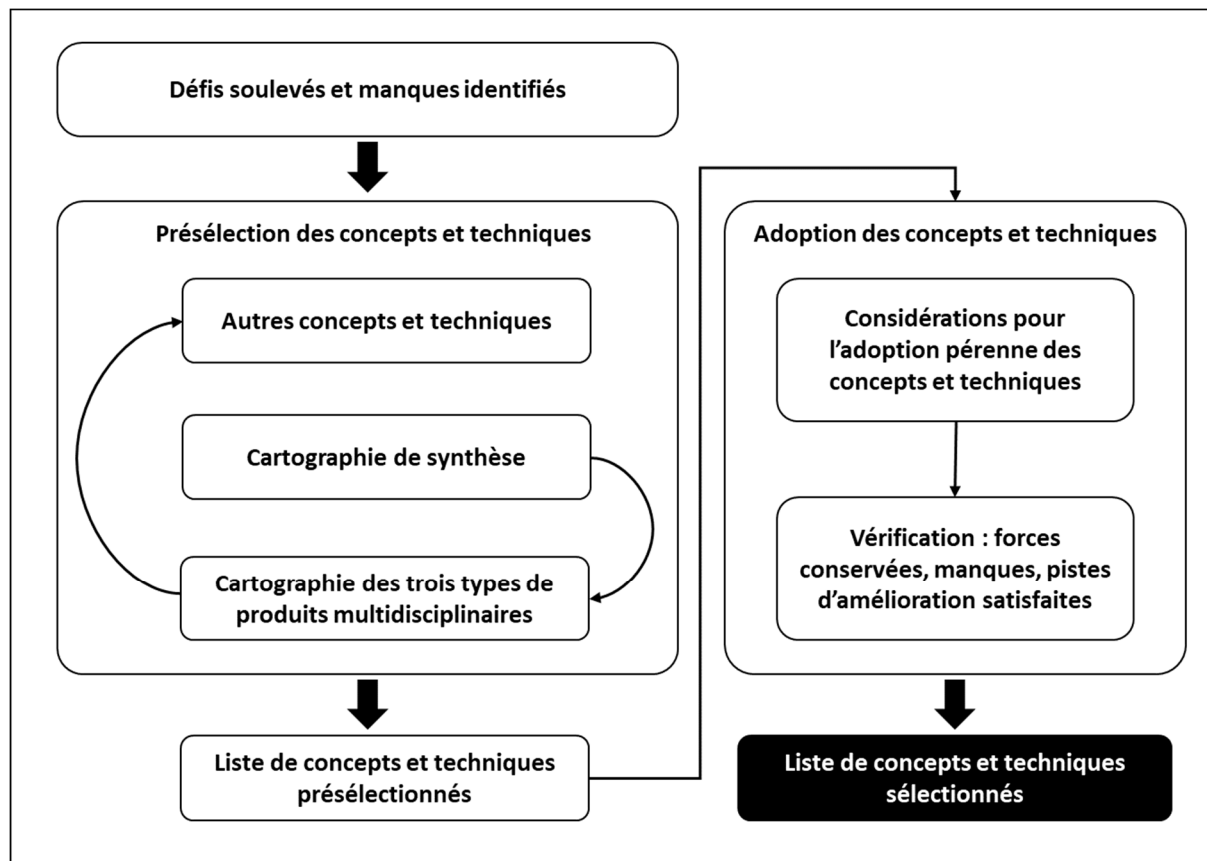


Figure 8.3 Utilisation des cartographies de la littérature scientifique pour la sélection des concepts et techniques

À la suite de la présélection, l'adoption doit être considérée. Comme évoqué au chapitre 3, différents chercheurs ont souligné la nécessité de prendre en compte les conditions limites d'application des concepts et techniques (López-Mesa, 2003), leur convivialité (Thia *et al.*, 2005 ; Albers *et al.*, 2014), ou encore leur temps d'apprentissage et de mise en œuvre (Thia *et al.*, 2005) pour ne citer que quelques exemples. D'autres considérations peuvent être ajoutées telles que la disponibilité du matériel de formation ou encore dans quelle mesure des adaptations peuvent être conduites. Enfin, à l'issue de ce second filtre, nous proposons de

vérifier que les inadéquations soulevées ne sont pas répétées, que les concepts et techniques et pans de structure qui apportaient satisfaction sont conservés ou disposent d'équivalences. Cette étape de sélection permet de converger vers une liste de concepts et techniques sélectionnés qu'il convient d'organiser afin de générer une nouvelle structure de développement.

8.1.6 Générer une nouvelle structure sur la base des concepts et techniques sélectionnés

Cette étape 6 traduit la formalisation d'une structuration, sous la forme d'une cartographie, et correspond à l'agencement des fragments et la constitution d'une nouvelle « méthode » chez (Brinkkemper, 1996). Au CHAPITRE 7, il a été conclu que l'ordre à privilégier était de l'approche vers les outils.

En premier lieu, afin de réaliser cette structure, si des concepts et techniques ont été sélectionnés hors cartographie, il convient de les classer au moyen de l'arbre de décision. Les concepts et techniques sélectionnés et classés peuvent ensuite être positionnés sur leurs niveaux respectifs. Par la suite, les liens qui unissent ces différents concepts et techniques doivent être tracés. Si la sélection a été réalisée à partir des cartographies de la littérature scientifique, les liens existants peuvent être repris de ces dernières. Il est également possible d'envisager la création de nouveaux liens opérationnels dans le cas où l'entreprise perçoit un échange possible d'informations ou une complémentarité entre des concepts et techniques.

8.1.7 Positionner les méthodes et outils sur les étapes du processus

Le formalisme de la cartographie est adéquat pour représenter la structure de développement. Toutefois, de par l'absence d'une mise en relation plus fine entre les étapes du processus et les méthodes et outils, ce formalisme pourrait trouver ses limites dans la conduite du développement. En d'autres termes, il faut considérer le déroulement logique des différentes étapes. Cette prise en considération favoriserait une meilleure mise en application par les équipes. L'étape 7 va dans ce sens et propose de positionner les méthodes et outils sur les

étapes du processus. On notera alors que ce positionnement permet de valider que chacune des étapes du processus est appuyée dans son exécution. Un exemple est proposé ci-dessous à travers la Figure 8.4.

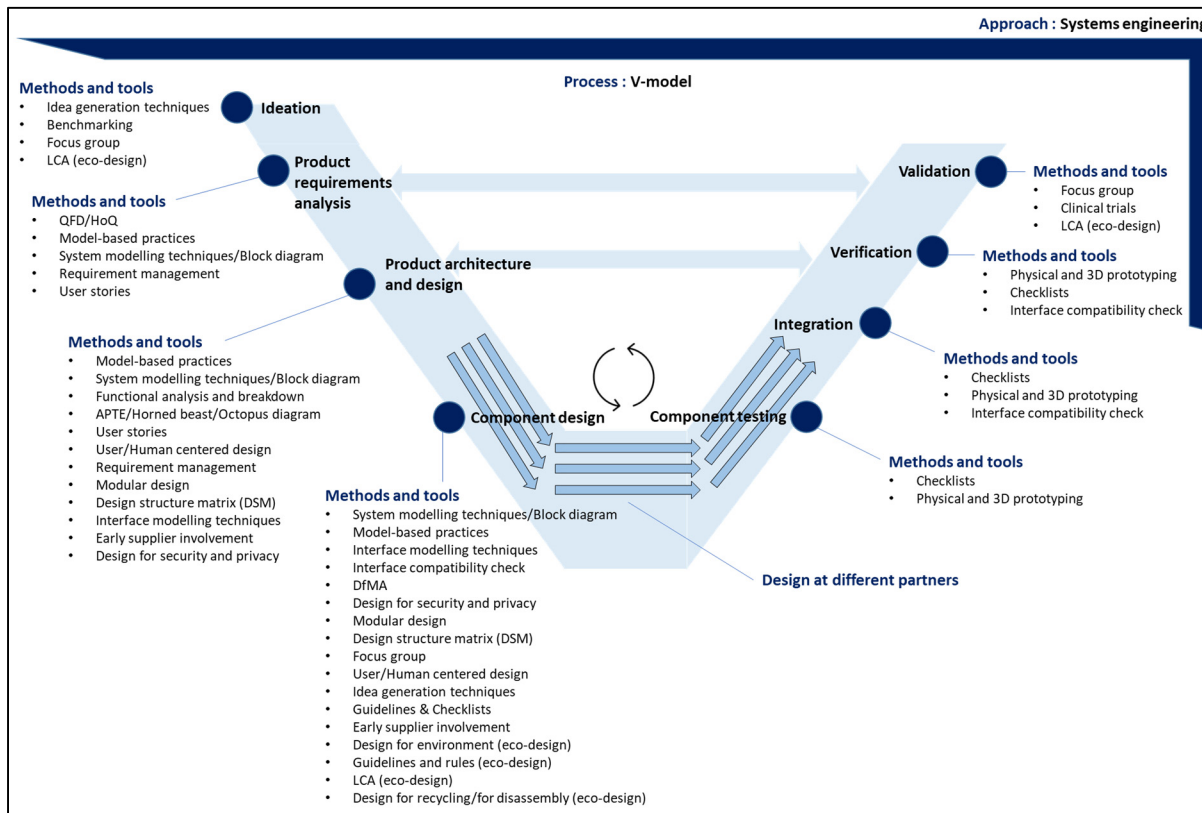


Figure 8.4 Positionnement des méthodes et outils sur les étapes du processus

Cet effort de positionnement s'accompagne également d'une réflexion sur l'adaptation des concepts et techniques aux équipes et contraintes de l'entreprise (Stetter et Lindemann, 2005). L'adaptation permet d'accommoder les différents usages et interprétations possibles. Enfin, selon Stetter et Lindemann (2005) l'adaptation des « méthodes » doit être conduite afin de garantir une meilleure intégration au sein du « processus ». D'une manière générale, il s'agit de s'adapter aux caractéristiques de l'entreprise, des équipes et du développement.

8.1.8 Déploiement sur un projet pilote reflétant le projet

Au cours de cette nouvelle étape, les concepts et techniques doivent être mis en application. Cette étape est décrite par Stetter et Lindemann comme la phase « d'implémentation effective » et demande une montée en compétence sur les concepts et techniques sélectionnés, leur mise en application, mais aussi une acceptation de la part des équipes du fait que ces derniers peuvent être en rupture par rapport à ceux utilisés précédemment. Pour soutenir la montée en compétence, Stetter et Lindemann (2005) soulignent trois aspects que sont l'apprentissage, l'entraînement/l'exercice et le mentorat entre les membres de l'équipe. Ces trois aspects peuvent être mis en application au sein d'un projet pilote, ayant de fortes similarités avec le produit multidisciplinaire visé et représentatif des défis soulevés. Ce projet pilote peut alors être un sous-ensemble du produit à développer, ou prendre la forme d'un démonstrateur réalisé en amont du projet.

8.1.9 Mesurer l'efficacité, identifier les points d'amélioration

Suite à l'application des concepts et techniques sur un projet pilote, cette étape vise à évaluer l'influence des transformations effectuées sur le développement (Stetter et Lindemann, 2005). Cette évaluation passe par la mesure des indicateurs établis à l'étape 4 afin de conclure si les objectifs ont été atteints, ce qui permet de déterminer si la performance souhaitée est atteinte. Des points d'améliorations peuvent ainsi être identifiés et pourront être mis en place lors du prochain développement.

L'issue de cette neuvième étape est représentée par le losange dans la Figure 8.1. Dans le cas où la structure ou les concepts et techniques n'apportent pas satisfaction, il est possible de revenir sur l'étape 5 de sélection des concepts et techniques afin d'en sélectionner des nouveaux. Si cela provient d'une mauvaise formulation des défis, il est nécessaire de retourner à l'étape 2. À l'inverse, si la nouvelle structure de développement et les concepts et techniques apportent satisfaction, l'étape 10 propose de les adopter plus largement. La cartographie

devient alors la nouvelle base de concepts et techniques sélectionnés et maîtrisés en interne pour le développement de produits multidisciplinaires. Enfin, la cartographie adoptée peut servir d'entrée à une prochaine itération dans le cas où de nouveaux défis auraient émergé (flèche en trait interrompu sur la Figure 8.1).

Cette étape clôt notre démarche. La section suivante aborde son évaluation.

8.2 Évaluation de la démarche d'accompagnement et de ses constituantes

Cette section discute d'une validation « idéale » avant d'aborder l'évaluation de nos travaux. Cette évaluation de la démarche d'accompagnement proposée et des contributions qui la constituent est discutée au regard des trois critères évoqués à la section 2.6. Pour rappel, ces critères portent sur la capacité à naviguer dans le corpus scientifique, la capacité à guider les entreprises dans la sélection des concepts et techniques appropriés à leur développement de produits et, enfin, la démarche doit être considérée comme utile pour les industriels.

Une première piste conduisant à une validation idéale de notre démarche et de ses constituantes pourrait résider dans une évaluation par le biais d'une comparaison appuyée par des indicateurs (Caillaud, Rose et Goepp, 2016). Les comparaisons envisagées cherchent à démontrer que l'application de la démarche mène à l'amélioration de la performance du développement, permettant de confirmer son utilité pour les entreprises – troisième critère. À noter que ce principe de comparaison est également employé entre l'étape 4 et l'étape 9 pour vérifier l'atteinte des objectifs fixés dans le cadre de la démarche. En ce sens, les indicateurs discutés par la suite viennent contribuer à la fois à la démarche en elle-même et à son évaluation.

En lien avec l'utilité perçue de la démarche pour l'industrie, comme le souligne Spitas (2011), les entreprises modifient leurs pratiques uniquement si elles y voient une valeur ajoutée ou un intérêt économique suffisant pour justifier l'effort et le risque associés, ce qui est parfois nommé « ratio coût-bénéfice ». En ce sens, des indicateurs de nature financière pourraient être

mesurés, tels que le **coût total du développement du produit, le dépassement par rapport à la cible, ou encore le retour sur investissement**. Des indicateurs temporels, en partie liés aux aspects financiers, pourraient également être collectés tels que le **temps de mise sur le marché**, ou encore le **temps sur les phases** de *preliminary design*, *conceptual design* et *detailed design*. Ces deux premiers types d'indicateurs – financiers et temporels – peuvent être collectés en gestion de projet pour suivre le déroulement du développement de produit. Cependant, une partie de ces aspects peut aussi être attribuable à la gestion du projet et au facteur humain, ce qui est hors de notre périmètre d'étude. En complément, sur le cas de la transformation des pratiques de développement de Boeing pour le projet du 777, Spitas (2011) fait état de trois indicateurs ayant influencé cette décision. Ces trois indicateurs portent sur : « **reducing costs** », « **improving the reliability of the development process** », et « **keeping up with the competition** » (Spitas, 2011). Toujours sur le déroulement du développement, nos travaux ayant vocation à accompagner l'augmentation de la complexité, la **complexité perçue** pourrait idéalement être collectée de manière qualitative, de la même manière que le niveau de **silotage** au sein de l'organisation.

Sur le produit en lui-même, différents indicateurs peuvent être mesurés. On pourrait alors collecter le **niveau d'intégration** suivant les calculs proposés par (Warniez, Penas et Soriano, 2012), ou encore l'atteinte de **performances** ciblées. Par ailleurs, bien qu'une partie soit tributaire de la production, il pourrait être envisageable de mesurer la **fiabilité par le taux de pannes** ou de **retours client**. De manière qualitative, d'autres indicateurs pourraient être collectés en lien avec le secteur industriel et la finalité attendue du produit, tels que la **satisfaction des clients**, la **convivialité du produit**, ou encore la **facilité d'usage**.

Sur la base de ces indicateurs, une démarche de validation idéale exigerait trois comparaisons complémentaires menées en parallèle sur la même évolution de produit, telles que représentées sur la Figure 8.5. Ces trois comparaisons s'appuieraient sur un développement de produit multidisciplinaire faisant suite au développement d'un produit « traditionnel ».

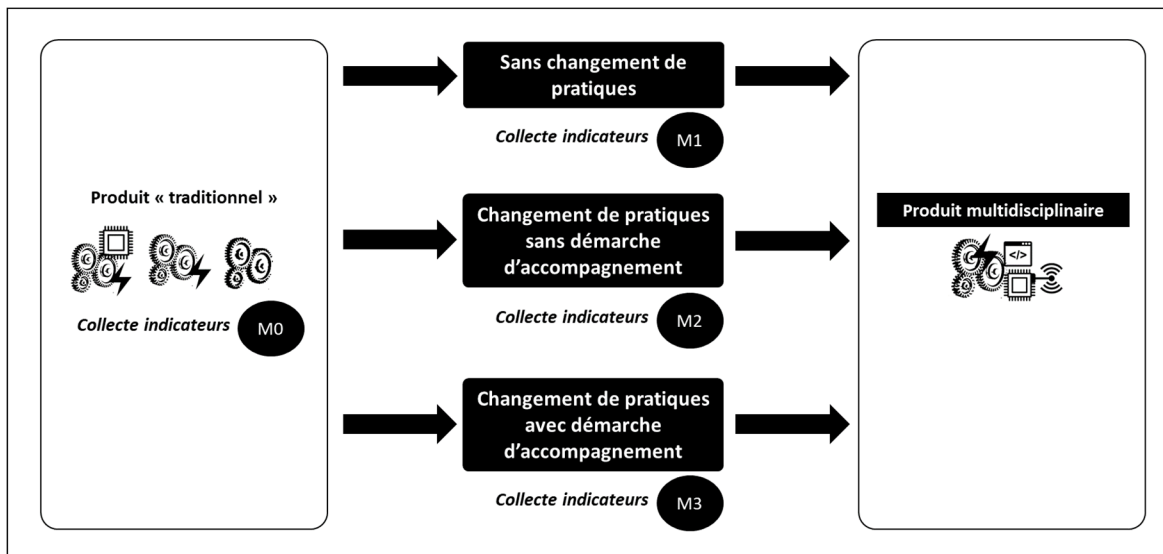


Figure 8.5 Validation idéale de la démarche d'accompagnement et de ses constituantes

La première comparaison entre les valeurs des indicateurs **M0** – collectés sur le développement d'un produit « traditionnel » – et les valeurs des indicateurs **M3** – collectés sur le développement d'un produit multidisciplinaire structuré par la démarche – permettrait de valider la transformation des pratiques et son effet sur l'amélioration de la performance du développement.

La deuxième chercherait à attribuer le gain effectif en performance au changement de pratique et non à d'autres modifications et facteurs en comparant les valeurs des indicateurs **M3** et **M1** – collectés sur un développement de produit multidisciplinaire sans changement de pratiques par rapport au développement du produit « traditionnel ».

La troisième, entre les valeurs des indicateurs **M3** et **M2** – collectés sur le développement multidisciplinaire non structuré par la démarche et les cartographies de la littérature scientifique – permettrait de démontrer l'avantage que procure notre démarche en comparant une entité (équipe, division, entreprise) conduisant des évolutions sur le développement avec et sans l'appui de la démarche d'accompagnement.

Ainsi, on pourrait conclure à une validation si les valeurs des indicateurs **M3** démontraient une meilleure performance que **M2**, eux-mêmes possiblement supérieurs à **M1**. Idéalement, ces résultats seraient reproductibles au sein de diverses industries.

Cette validation idéale, prenant place dans un contexte industriel, ne peut être réalisée pour des raisons pratiques, car reposant *a minima* sur trois développements – dans l’hypothèse où les indicateurs M0 ont été collectés sur un projet passé. La conduite de trois développements en parallèle soulève la question de la reproductibilité. En effet, les produits issus de différentes équipes et processus comporteront nécessairement des différences, ce qui peut limiter les comparaisons. Toujours pour des raisons pratiques, la validation de la sélection – notre deuxième critère – devrait idéalement déployer les structures possibles mais non sélectionnées, afin de démontrer que les structures écartées étaient effectivement moins adéquates. Cette validation dans un contexte industriel soulève également la question du coût pour l’entreprise qui doit conduire plusieurs fois le même développement. Par ailleurs, la sélection et la mise en œuvre de concepts et techniques moins adéquates – pour valider la sélection – ou encore le développement permettant de collecter les indicateurs M1 peuvent se solder par des échecs. En ce sens, comme le souligne Wieringa (2009), au-delà du coût, l’aspect « moral » entre également en ligne de compte dans le cadre d’une validation en entreprise.

Weiringa suggère à ce titre le recours au « technical action research (TAR) approach, where the researcher validates a technique by using it herself in a real project under conditions of practice » (Wieringa, 2009). Ce « modèle de validation » consiste en « a realistic version of the artifact interacting with a real-world context » (Wieringa, 2014). Le recours à ce modèle de validation semble également aller dans le sens de ce qui est avancé par Blessing et Chakrabarti (2009) afin de conduire une évaluation de la solution : « a very suitable first indication of the applicability and suitability of newly proposed support can be obtained from running through an example illustrating, as a researcher, what and how the support would work ». Il apparaît alors comme tout à fait valide, en tant que chercheurs, d’appliquer par nous-mêmes la démarche sur une étude de cas industriel afin d’obtenir une première évaluation de

sa viabilité (Caillaud, Rose et Goepp, 2016 ; Johannesson et Perjons, 2014). Au-delà de la démonstration que nos travaux sont applicables et viables en contexte industriel, l'étude de cas confère aussi une dimension plus pragmatique aux travaux en démontrant concrètement leur usage sur un cas industriel réel. Selon Caillaud, Rose et Goepp (2016), cette application industrielle est un élément important pour un éventuel usage de la proposition dans l'industrie. En ce sens, le choix a été fait d'évaluer notre démarche d'accompagnement, et notamment le troisième critère, à travers l'implémentation d'une étude de cas industriel.

L'étude de cas contribue aussi à évaluer la **sélection des concepts et techniques** – notre deuxième critère –, à travers la mise en pratique du mécanisme d'association entre des défis et des concepts et techniques **appropriés au développement de produits**. Par ailleurs, la sélection débutant par les cartographies de la littérature scientifique, les concepts et techniques qui y sont sélectionnés peuvent être considérés comme appropriés pour soutenir le développement de produits multidisciplinaires. Enfin, la mise en évidence de possibles consensus ainsi que des liens entre les concepts et techniques au sein des cartographies de la littérature scientifique permettent de guider cette étape de sélection. L'évaluation de notre deuxième critère bénéficie en ce sens de l'étude de cas, qui peut être complétée par un « informed argument » pour étayer notre propos quant à un usage de la sélection par les industriels (Johannesson et Perjons, 2014). Un « informed argument » traduit une évaluation par une argumentation et un raisonnement permettant d'expliquer, du point de vue des chercheurs, la manière dont la solution répond aux critères et au problème identifié (Johannesson et Perjons, 2014).

Pour terminer, l'étude de cas contribue dans une moindre mesure à l'évaluation de notre premier critère, portant sur la capacité à naviguer dans le corpus scientifique. En ce sens, l'évaluation de notre premier critère est majoritairement argumentée au regard d'« informed arguments » (Johannesson et Perjons, 2014). Nos cartographies s'appuient sur une revue de la littérature permettant de répertorier, d'organiser puis de représenter graphiquement une partie du corpus scientifique traitant du développement de produits multidisciplinaires. Le caractère

graphique de nos cartographies, ainsi que les informations contenues, nous permettent de défendre une amélioration de la **capacité à naviguer dans le corpus scientifique** par rapport à l'existant. Ce point peut être étayé par les observations de Bertschi *et al.* (2013) qui soulignent que « for most people we may state that complex dependencies and interactions can more easily be understood when illustrated ».

Cette section a permis d'aborder l'évaluation de nos travaux au regard des critères établis. Cette évaluation repose en partie sur des « informed arguments » et sur une étude de cas qui est présentée au chapitre suivant.

8.3 Synthèse de la proposition

Ce chapitre a permis de présenter les dix étapes constitutives d'une démarche d'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires, puis d'aborder la question de la validation de nos travaux.

La Figure 8.6 offre une synthèse graphique permettant d'illustrer comment la démarche d'accompagnement proposée intègre les différentes contributions. L'encadré gris représente ainsi le cœur de notre chapitre à travers la démarche proposée (identifiée en orange). Ces éléments s'appuient sur les résultats de la comparaison présentée au chapitre 7 (identifiés en rouge), qui s'appuient à leur tour sur ceux de l'analyse de la littérature scientifique présentée au chapitre 5 (identifiés en vert) et de l'analyse des pratiques industrielles discutées au chapitre 6 (identifiés en bleu). Les éléments contenus dans les encadrés blancs soulignent quant à eux les résultats repris de ces chapitres précédents. Enfin, on retrouve sur le haut de la Figure 8.6, l'évolution des produits « traditionnels » vers des produits multidisciplinaires, nous permettant de nous repositionner dans le cadre général de l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire et des transformations associées (bandeau supérieur orange).

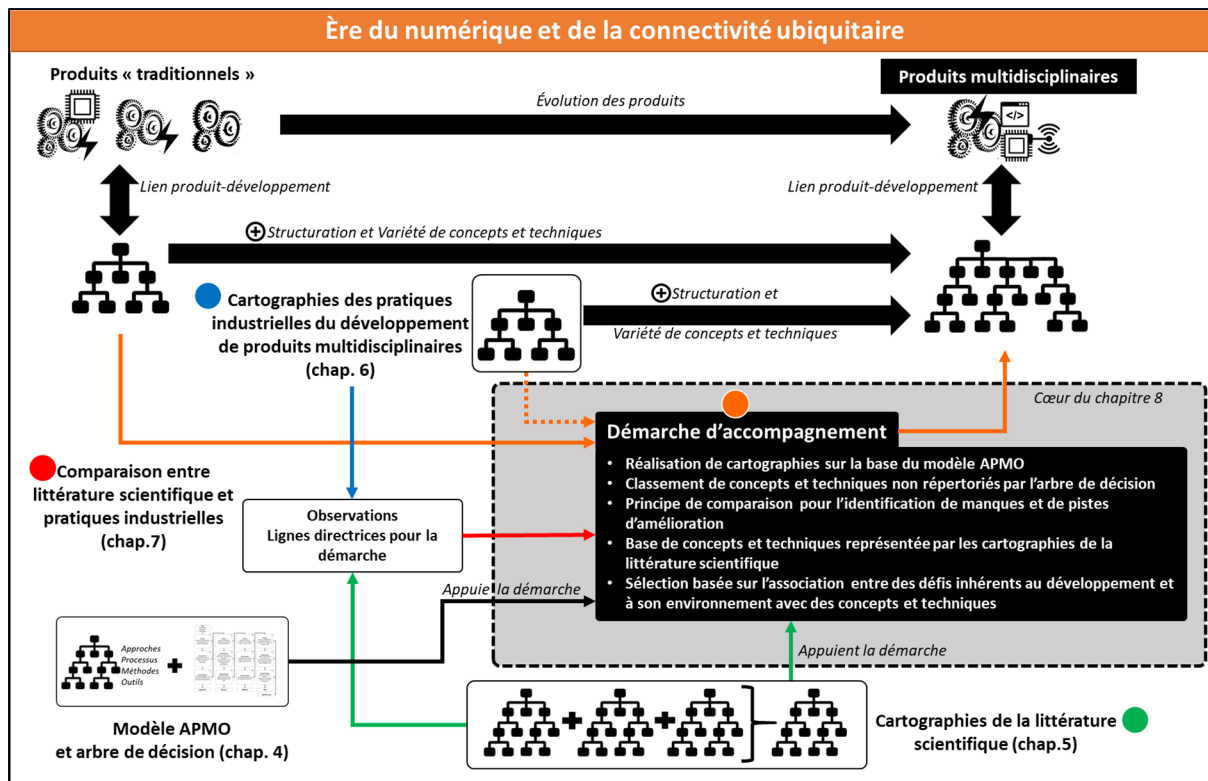


Figure 8.6 Synthèse de notre démarche pour l'accompagnement des entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement

Cette démarche d'accompagnement des entreprises représente un début de réponse à notre **objectif principal** de recherche. Elle s'appuie sur des briques de connaissances existantes de la littérature scientifique, notamment pour l'enchaînement des principales étapes (Stetter et Lindemann, 2005), le principe de construction à partir d'une base de « méthodes » (Brinkkemper, 1996), l'identification des facteurs internes et externes (Wilmsen, Dühr et Albers, 2019), l'orientation vers la résolution de défis (Araujo Jr., 2001 ; López-Mesa, 2003 ; Stetter et Lindemann, 2005 ; Braun et Lindemann, 2003) et enfin la recherche d'une adoption pérenne (Thia *et al.*, 2005 ; Albers *et al.*, 2014 ; López-Mesa, 2003). Elle se distingue majoritairement à travers la réalisation des étapes 3, 4, 5, et 6. Ces étapes se basent en effet sur l'emploi de nos contributions, que sont le modèle APMO et l'utilisation de l'arbre de décision pour réaliser des cartographies, l'identification possible des manques par comparaison avec les cartographies de la littérature scientifique, et l'emploi de ces dernières lors de l'étape de

sélection qui se base sur une association entre des défis et des concepts et techniques – illustré par la flèche verte pointant vers la démarche. Ces apports sont résumés dans l’encadré noir attaché à la démarche d’accompagnement.

Sur la Figure 8.6, il apparaît que notre démarche couvre deux usages qui permettent de répondre en partie à notre **objectif principal**. Un premier usage, symbolisé par la flèche orange en trait continu, vise à accompagner les entreprises dans l’évolution de leurs produits « traditionnels » vers des produits multidisciplinaires. Un second usage, illustré par la flèche orange en trait interrompu, permet d’accompagner les entreprises qui ont débuté leur évolution vers des produits multidisciplinaires, telles que celles étudiées au chapitre 6, dans l’amélioration de leur structure de développement. Enfin, bien que l’accent soit mis sur le gain en structuration et en variété de concepts et techniques, d’autres bénéfices pourraient également être atteints, notamment à travers les réponses aux défis.

La seconde partie du chapitre a permis d’envisager des indicateurs pouvant être employés à la fois au sein de la démarche afin de conclure sur l’atteinte des objectifs, et au sein d’une démarche de validation reposant sur des études comparatives. Cependant, cette validation idéale ne pouvant être mise en pratique pour les raisons évoquées, le choix d’évaluer notre démarche à travers une étude de cas industriel, présentée au chapitre suivant, a été fait.

CHAPITRE 9

APPLICATION DE NOS TRAVAUX : ÉTUDE DE CAS DU DÉVELOPPEMENT D'UN ÉQUIPEMENT AGRICOLE

Le chapitre précédent a permis de proposer une démarche permettant d'accompagner les entreprises dans l'évolution de leurs pratiques de développement, puis d'aborder la validation de nos travaux. En lien avec cette dernière, ce chapitre présente une application des étapes clés de la démarche proposée, à travers une étude de cas portant sur le développement d'une nouvelle génération de barre de coupe de moissonneuse-batteuse. Cet équipement, traditionnellement mécanique, a évolué au cours des dernières années vers un produit multidisciplinaire complexe intégrant des capteurs, une collecte de données, allant jusqu'à explorer l'intégration de la connectivité. Cette étude de cas réel nous permet de démontrer l'intérêt de nos travaux dans un contexte industriel. La section 9.1 présente les éléments méthodologiques de l'étude de cas de la démarche décrite étape par étape à travers les sections 9.2 à 9.9. La section 9.10 offre une synthèse de ce chapitre.

9.1 Méthodologie de l'étude de cas et mise en contexte

Une étude de cas au sein de l'entreprise « G » de nos entrevues a été réalisée afin d'évaluer l'applicabilité et la viabilité de notre démarche dans un contexte industriel. La démarche d'accompagnement proposée allant au-delà des conclusions tirées lors des entrevues menées dans cette entreprise, cela nous permet de nous appuyer de nouveau sur cette dernière. Par ailleurs, une partie de ses produits ont évolué vers des produits multidisciplinaires au cours des dernières années et l'entreprise a mené une profonde réflexion sur l'évolution de ses pratiques de développement. En ce sens, sa situation est représentative de notre **problématique de recherche**.

Pour les besoins de notre étude de cas, nous nous sommes déplacés au sein de leur entreprise, pour une durée cumulée de 8 jours au cours desquels nous avons pu réaliser des observations

et collecter des données sur la manière dont l'entreprise développe ses produits. Le profil des personnes interrogées est détaillé dans le Tableau 9.1 avec leurs titres et départements respectifs. Nous avons ainsi pu mener des entrevues semi-dirigées auprès des 8 personnes constituant le département d'ingénierie – *engineering department*. Afin d'avoir une vision plus représentative de l'entreprise et de ses défis, nous avons également pu interroger l'un des fondateurs de l'entreprise (I4), le gestionnaire de production (I12), et le département d'analyse des opérations (I10 et I11) dont le but est d'améliorer les pratiques au sein de l'entreprise, incluant celles de développement de produits. Afin de mener ces onze entrevues (I10 et I11 ont été interrogées au cours de la même entrevue), une trame d'entrevue a été élaborée sur la base de celle réalisée pour le chapitre 6. Les questions ont été adaptées et ciblées par rapport au profil des interlocuteurs, afin de mettre en lumière les bonnes pratiques et les défis liés au développement de produits. Les données ont été consignées dans des rapports d'entrevues. En complément, nous avons pu avoir accès à différents documents internes de l'entreprise. L'ensemble de ces données nous a permis d'appliquer notre démarche d'accompagnement.

Tableau 9.1 Interlocuteurs rencontrés pour l'étude de cas

Code	Département	Titre du poste	Ancienneté
I1	Engineering department	Components System Integration manager	5 ans
I2	Engineering department	R&D Project engineer	7 ans
I3	Engineering department	Production engineer	1 an
I4	-	Co-founder and owner	31 ans
I5	Engineering department	Project engineer	16 ans
I6	Engineering department	Engineering coordinator	5 ans
I7	Production engineering	Production engineer	2 ans
I8	Engineering department	R&D Project engineer	12 ans
I9	Engineering department	R&D engineer	7 ans
I10	Operations Analysis department	Information facilitator	4 ans
I11	Operations Analysis department	Operations manager (former)	9 ans
I12	Operations - Production	Operations manager (new)	4 mois

9.2 Contexte de l'entreprise et caractéristiques du produit à développer

Cette section décrit les éléments permettant de comprendre et d'analyser le contexte de l'entreprise, correspondant en partie à l'étape 1 de notre démarche – voir Figure 8.1. Les prochains paragraphes décrivent le produit auquel nous nous intéressons ainsi que ses principales caractéristiques, avant de retracer son évolution dans le contexte de l'entreprise. Cette évolution est discutée au regard des modifications apportées au fonctionnement du département d'ingénierie.

Cette entreprise, traditionnellement à forte dominante mécanique, développe, fabrique et assemble une gamme d'équipements agricoles. Parmi leur gamme de produits, nous nous intéressons ci-après à une barre de coupe de moissonneuse-batteuse – *header* – illustrée par la Figure 9.1. La barre de coupe a pour objectif de maximiser la quantité récoltée pour les différentes cultures ciblées (blé, orge, soja, moutarde, canola, etc.). À titre indicatif, la performance visée dépasse en général les 95% du grain disponible. Ces produits ont une durée de vie minimale de 10 ans (environ 3000 heures de fonctionnement) et sont vendus internationalement.

Ces produits sont constitués de structures mécanosoudées et de pièces de tôlerie sur lesquelles sont montés différents éléments en mouvement comme le rabatteur, les convoyeurs, les couteaux, les vis d'alimentation (pour certains modèles) qui peuvent être entraînés mécaniquement (courroies, cardans, etc.) ou hydrauliquement. Ces produits sont modulaires afin de pouvoir être configurés dans différentes tailles (s'échelonnant en général de 7m à 15m, pour des masses de 2 000kg à plus de 4 000kg), mais aussi être montés au moyen d'un adaptateur sur une variété de moissonneuses-batteuses. En effet, chaque fabricant de moissonneuses-batteuses dispose de sa propre interface, qui parfois change en fonction des années et des modèles. Ce besoin de variété est satisfait par autant d'adaptateurs, dont il résulte une multitude de configurations possibles. Nous reviendrons sur les différentes interfaces dans les défis liés au développement à la section 9.3.

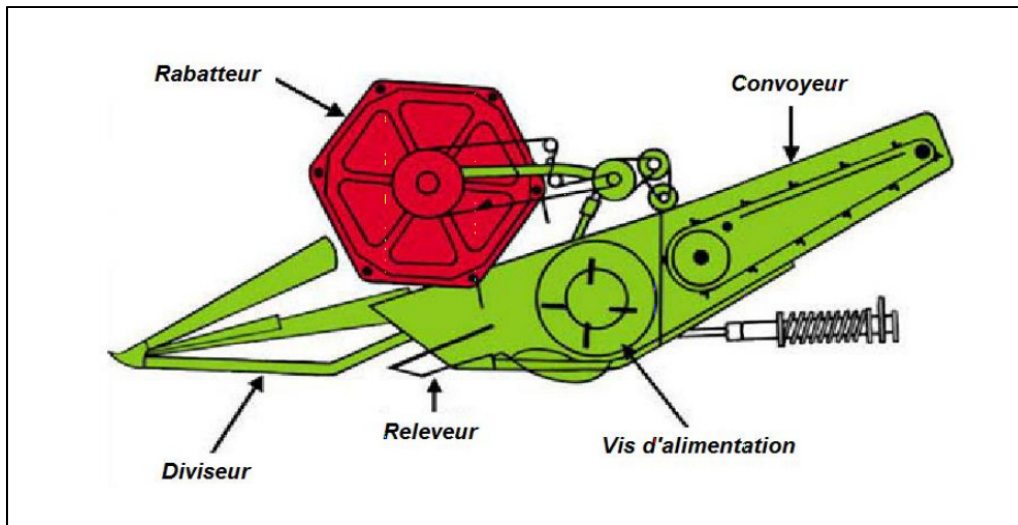


Figure 9.1 Représentation de la barre de coupe d'une moissonneuse-batteuse
Tirée de El Aissaoui (2015)

Dans les années 1990, ce produit mobilisait exclusivement des composants mécaniques, hydrauliques et électriques – plateforme P1 sur la Figure 9.2. Désormais, parmi leurs produits, on retrouve du développement informatique, des composants électroniques et des composants pneumatiques qui viennent s'ajouter aux composants mécaniques, hydrauliques et électriques. L'ajout de l'électronique et du logiciel permet au produit de disposer d'une barre de coupe flexible qui s'adapte et suit les mouvements du terrain, conférant au produit une meilleure performance sur certains types de récolte. Une version prototype de la plateforme P3 disposait également de solutions de connectivité, d'enregistrement de plus de 150 paramètres et d'une capacité d'autodiagnostic. Néanmoins, la version commercialisée et les variantes subséquentes (P3.1, P3.2, et P3.3) n'intègrent ni la connectivité ni la capacité d'autodiagnostic, mais conservent l'enregistrement des paramètres pendant 8 jours. La Figure 9.2 synthétise l'évolution du produit à travers trois plateformes (P1, P2 et P3) qui intègrent successivement de nouvelles disciplines. La plateforme P3 est la plus récente et la plus aboutie. Cette plateforme P3 a nécessité 5 ans de développement, contre 7 ans pour la plateforme P2. Cependant, l'intégration de l'électronique et du logiciel semble avoir soulevé des défis supplémentaires (I1 & I4), tels qu'une diminution de la fiabilité ou encore de la performance. Ces problèmes ont toutefois pu être résolus sur les itérations suivantes. Devant ces problèmes,

l'entreprise a songé à faire marche arrière et ne plus intégrer d'électronique. Cependant, cela est désormais imposé par certains fabricants de machines. L'intégration d'électronique devient donc conditionnelle à la compatibilité avec les moissonneuses-batteuses. Cette plateforme P3 est déclinée en trois variantes. La plateforme P3 comporte 2200 pièces différentes (6000 pièces au total) contre 1800 pièces différentes pour la variante P3.2. Cette variante simplifiée dispose de moins d'options au bénéfice d'un coût plus faible.

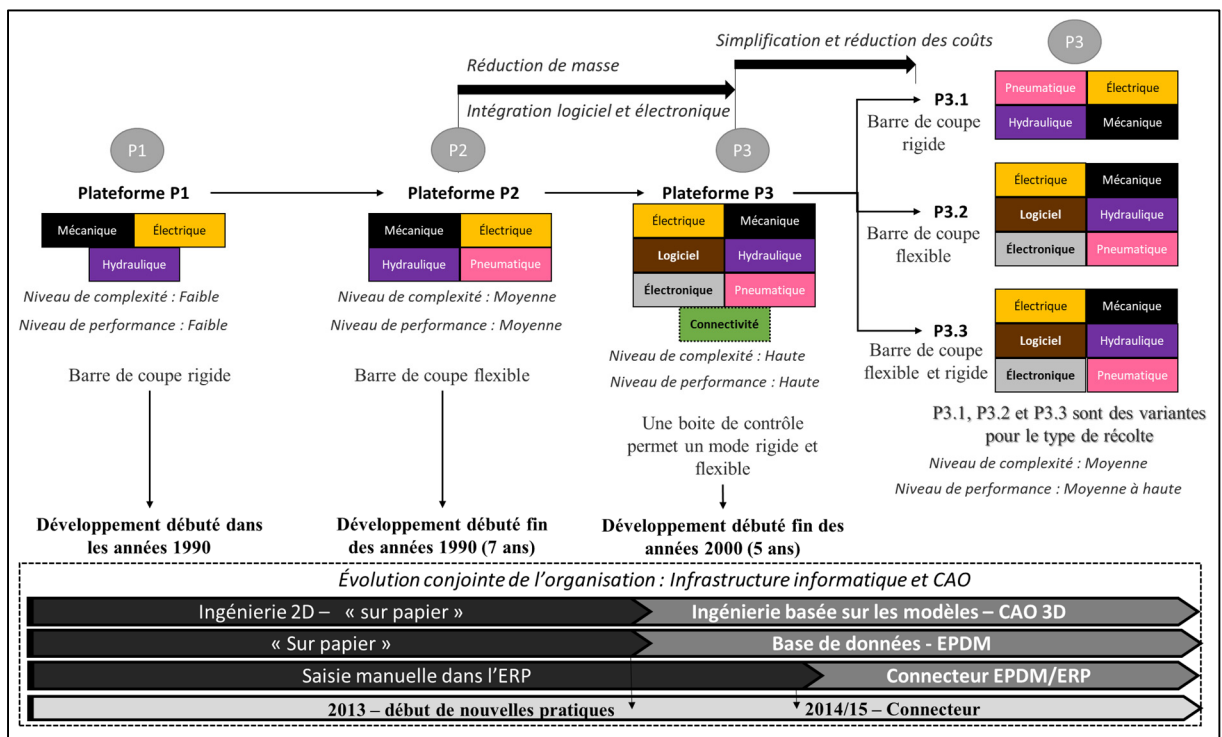


Figure 9.2 Synthèse de l'évolution des produits et du département d'ingénierie au sein de l'entreprise étudiée

La Figure 9.2 fait également apparaître les niveaux de complexité et de performance évalués de manière qualitative. Le développement de la plateforme P3, qui inclut le prototype disposant de connectivité, semble alors se distinguer avec la plus forte complexité, mais a permis d'atteindre un plus haut niveau de performance que les plateformes précédentes. Ce qui semble aller dans le sens de la littérature scientifique concernant l'atteinte de meilleures performances

permettant de justifier l'évolution vers ces nouveaux produits d'une complexité plus importante.

Enfin, l'entreprise s'est interrogée sur la manière de développer ces nouveaux produits et s'intéresse aux opportunités offertes par « l'Industrie 4.0 ». Elle a également entamé une transformation profonde de ses outils informatiques pour l'ingénierie en 2013, avec l'acquisition d'un logiciel de CAO 3D jumelé avec un logiciel de type *product data management* (PDM), afin de remplacer un fonctionnement essentiellement basé sur papier et un développement réalisé en 2D. Un connecteur a été ajouté en 2014/2015 afin de faire le lien entre le PDM et le logiciel de type *enterprise resource planning* (ERP). Ces évolutions sont représentées sur la partie basse de la Figure 9.2. Par ailleurs, auparavant, chaque personne travaillait « à sa manière ». Désormais, selon I6, certains éléments demeurent informels, mais l'entreprise a travaillé à formaliser et à documenter une manière de travailler commune. Sur le volet humain, l'entreprise a intégré de nouvelles compétences par le recrutement du « Components Systems Integration (CSI) Manager » (I1), qui s'est occupé de l'intégration des nouvelles disciplines. Enfin, comme nous avons pu le voir au chapitre 6, l'entreprise fait évoluer ses pratiques de développement, notamment à travers l'usage progressif de pratiques basées sur les modèles et l'utilisation de techniques de modélisation système pour la partie électronique et logicielle. Le langage UML est utilisé pour modéliser la partie comportementale et générer la structure du code associé. Cette évolution a en partie été entreprise à travers la collaboration avec un sous-traitant responsable d'une partie du développement de l'électronique. L'entreprise démontre en ce sens une volonté d'évoluer et de soutenir au mieux son pôle d'ingénierie.

Cette section a permis de dresser un portrait global du contexte de l'entreprise et de préfigurer les défis liés au produit et à son développement, qui sont décrits plus en détail à la section suivante.

9.3 Défis rencontrés en lien avec le développement et le produit associé

Différents défis découlent de ce contexte et ont pu être formulés au cours des entrevues. Cette étape correspond à l'étape 2 de notre démarche d'accompagnement. Nous présentons ci-après les défis relatifs au produit (**défis 1 à 5**), puis au développement (**défis 6 à 14**). Ces défis sont regroupés dans le Tableau 9.2.

Comme évoqué précédemment, un des défis liés au produit correspond à la compatibilité de leur équipement avec les moissonneuses-batteuses, assuré par un adaptateur. D'autres interfaces mécaniques (entraînement des éléments mobiles), mais aussi hydrauliques, électriques (5V ou 10V), et désormais électroniques doivent également être considérées. Le produit doit également pouvoir être configuré dans différentes tailles. Enfin, il ressort de nos entrevues avec les interlocuteurs I4, I5 et I9 que le produit est développé dans une perspective d'évolution et d'amélioration continue à travers des changements mineurs conduits d'année en année qui peuvent faire l'objet de tests. Une partie de l'évolutivité du produit fait suite à des retours client (I5 et I6), mais est aussi attribuable à un environnement changeant, notamment par la commercialisation de nouveaux modèles de moissonneuses-batteuses sur le marché pouvant se traduire par de nouvelles interfaces (I1). Cette évolutivité est intégrée dès les premières versions de la plateforme. À ce titre, le CSI Manager (I1) souligne que « [Module électronique] has been designed with the intention of being able to support more functionalities and connectivity integration ». Cela est rendu possible par un nombre volontairement plus important de ports entrée-sortie lors du développement de la carte électronique. Ces trois aspects, que sont l'évolutivité du produit, la présence de multiples interfaces et de multiples configurations sont synthétisés à travers la formulation de trois défis – **défi 1**, **défi 2** et **défi 3**.

D'autres défis peuvent également être formulés à partir des critères d'évaluation du produit. Pour l'interlocuteur I1, trois sont primordiaux : utilisabilité, fiabilité et performance – calculée en pourcentage de la récolte collectée. Pour notre interlocuteur I4, la diminution du coût ainsi que le maintien ou l'augmentation de la performance des produits sont deux critères

primordiaux. L'interlocuteur I8 s'accordait quant à lui sur la simplicité d'utilisation, avant de mentionner « bigger, faster, cheaper ». Enfin, l'interlocuteur I6 résumait cela à plus léger, moins cher, plus facile d'utilisation, plus simple à produire, et « deliver a better function to the customer ». Nous comprenons ce dernier élément comme délivrer plus de valeur au client. Enfin, la maintenabilité a été mentionnée par l'interlocuteur I9 au regard de la durée de vie minimale de 10 ans. Ces différents critères apparaissent être au cœur du développement du produit et peuvent ainsi être regroupés sous la forme d'un défi, ici le **défi 4**.

Dernier des défis formulés en lien avec le produit, le **défi 5** met en avant la réutilisation des pièces de projets passés au sein des nouveaux produits, tel que souligné par notre interlocuteur I4. Cet aspect semble être en partie outillé. En effet, au sein du logiciel de CAO, ils ont créé une « toolbox » au sein de laquelle « about 90% of the hardware is already modeled » (I4). Cette boîte à outils, initiée en 2014, s'appuie sur des libraires et des catalogues paramétrés par des tables de conception – *design tables* – afin de restreindre les pièces utilisables au sein des assemblages CAO. Par exemple, le rabatteur – voir Figure 9.1 – est réemployé entre plusieurs modèles de barre de coupe.

Le développement du produit s'appuie sur l'identification d'un besoin par les fondateurs de l'entreprise au sein de leurs exploitations agricoles. Toutefois, selon I6, le besoin identifié et les exigences associées ne sont pas toujours formalisés au sein de documents pour les équipes d'ingénierie (I6) : « requirements are in [I4]'s head ». Cela a été confirmé par notre interlocuteur I8 développant des produits avec le second fondateur : « the design requirements are in [second fondateur]'s head ». Les fondateurs demeurent alors impliqués au long du processus de développement, afin de guider le développement et représentent en ce sens l'internalisation du client et des besoins associés. Cependant, cette internalisation de l'expression du besoin, mais aussi du rôle du client, pourrait s'estomper au cours des prochaines années avec le départ à la retraite des fondateurs. Cette situation permet d'identifier deux défis, identifiés par la suite comme **défi 6** et **défi 7**.

Tableau 9.2 Défis relatifs au produit et au développement au sein de l'entreprise étudiée

Défis relatifs au produit (défis 1 à 5)
Défi 1 : Le produit doit être opérable avec une multitude de machines, ce qui nécessite un interfaçage mécanique, électrique, hydraulique et électronique.
Défi 2 : Le produit doit être disponible en plusieurs tailles.
Défi 3 : Le produit doit pouvoir être évolutif et être amélioré chaque année.
Défi 4 : Le produit doit être simple à produire, offrir plus de valeur au client, tout en étant possiblement moins cher et en maintenant un niveau égal ou supérieur de performance, de fiabilité et de facilité d'usage par rapport à sa version antérieure.
Défi 5 : Le produit doit réutiliser au maximum les pièces des projets passés.
Défis relatifs au développement (défis 6 à 14)
Défi 6 : La structure de développement doit recueillir puis organiser les besoins des clients afin de les décliner en exigences.
Défi 7 : La structure de développement doit internaliser la voix du client pour valider l'orientation prise par le produit au cours du développement.
Défi 8 : La structure de développement doit dépasser le déroulement actuel du développement sur un schéma essai et erreur qui mène à des itérations longues et coûteuses.
Défi 9 : La structure de développement doit permettre de réduire le nombre de prototypes physiques complets réalisés au cours du développement.
Défi 10 : La structure de développement doit contribuer à mieux intégrer développement et production, en prenant notamment en compte les contraintes de production lors des phases amont du développement.
Défi 11 : La structure de développement doit permettre de maintenir des connaissances sur les produits et le développement.
Défi 12 : La structure de développement doit minimiser le travail en silo et améliorer ainsi la collaboration.
Défi 13 : La structure de développement doit permettre un développement concourant tout en maintenant les possibilités de créativité.
Défi 14 : La structure de développement doit soutenir la génération puis la sélection d'idées.

Toujours en lien avec l'absence d'une formulation d'exigences et d'un besoin pour les équipes, le développement est conduit sur un schéma de type essai et erreur piloté par les fondateurs, menant à la réalisation de prototypes physiques complets qui sont comparés à ce qui était souhaité. En cas d'écart, une nouvelle itération est alors réalisée depuis les dessins techniques (I4, I6 et I8) jusqu'à converger vers un prototype qui réponde au besoin identifié, et qui atteigne la performance souhaitée (I6). La réalisation de ces prototypes physiques du produit au complet représente un coût important. Par ailleurs, ils contraignent fortement la temporalité du développement. En effet, les tests réels doivent être réalisés au cours de l'été pour tester les prototypes de barre de coupe. Pour la première version de la plateforme P3, 4 prototypes ont ainsi été réalisés. Cela tend à évoluer à travers le recours à des prototypes virtuels, et notamment le recours aux calculs et à l'analyse par éléments finis. Notre interlocuteur I8 souhaite par ailleurs que plus de tests sur bancs d'essai soient réalisés pour une réduction des coûts, et pour des validations de sous-ensembles. Il y a pour lui un équilibre à trouver entre les itérations sur un prototype physique et les calculs de conception : « a good balance needs to be found between iterative and design calculations ». Le département d'analyse des opérations (I10 et I11) semble également soutenir la piste de réduction des prototypes physiques, notamment par le recours aux modèles 3D et à l'ingénierie basée sur les modèles. Ces observations nous amènent à formuler deux défis, identifiés par la suite comme **défi 8** et **défi 9**.

Les entrevues ont également permis d'aborder l'intégration entre le développement et la production. Avant la mise en place du PDM – voir Figure 9.2 –, le fonctionnement était de type « over-the-wall » (Ullman, 2009) selon l'*Engineering coordinator* (I6). D'après I6, un écart subsiste entre l'équipe de recherche et développement et la production, mais également avec les achats et la vente. Une des contraintes sur le développement réside dans le fait que le produit doit être fabriqué au maximum avec les moyens de production internes. Par ailleurs, selon I9, la prise en considération des contraintes de production des pièces et du produit complet arrive tardivement dans le processus de développement : « Late prototype phase ». Dans le cas de la mise en production de la plateforme P3, l'*Operations manager* (I12) a souligné que la complexité plus importante du produit et des problèmes avec des sous-traitants

se sont traduits par un nombre de rebuts plus important. En ce sens, le **défi 10** traduit la nécessité de prendre en considération les contraintes de production plus tôt dans le processus de développement.

Parmi les autres défis en lien avec le développement, l'importance de capitaliser sur les connaissances des projets passés a également été soulignée par nos interlocuteurs I5 et I8. Toutefois, ces connaissances, bien que jugées cruciales, restent peu formalisées au sein de l'entreprise. À cet effet, le CSI Manager (I1) a exprimé le besoin capter et de stocker la connaissance, menant à la formulation du **défi 11**.

Sur les aspects relatifs à l'organisation, selon nos interlocuteurs I6 et I9, le développement du produit et les aspects liés à la production (approvisionnements et vérifications que le produit peut être fabriqué) sont parallélisés afin de gagner du temps. En ce sens, ils réalisent de l'ingénierie concourante lorsqu'il y a un besoin d'accélérer le développement de certaines tâches pour converger vers une mise en production ou accélérer la réalisation d'un prototype (I6), notamment pour la mise en test à l'été. Toutefois, selon l'interlocutrice I11 du département d'analyse des opérations, l'entreprise demeure encore assez éloignée d'un fonctionnement en ingénierie concourante et, selon certains de nos interlocuteurs, le travail demeure encore siloté. En lien avec l'organisation générale du développement, il nous est ainsi possible d'identifier deux défis, le **défi 12** en lien avec le travail en silo, et le **défi 13** en lien avec le développement concourant.

Selon nos interlocutrices (I10 et I11), la conservation d'un « farmer mindset » au sein de l'ingénierie demeure l'un de leurs principaux défis. Cela rejoint le besoin de réintégrer le point de vue utilisateur, toutefois, c'est le caractère innovant qui est ici discuté. Les innovations actuelles émergeaient des observations des fondateurs. L'interlocutrice I11 souhaite pour cela le déploiement du *Design thinking* qui se traduit par l'observation par les équipes d'ingénierie de la manière dont les agriculteurs opèrent les machines. Ces observations doivent permettre d'identifier des « latent needs » (I11) et, *in fine*, de converger vers des solutions innovantes.

Ce besoin de mieux structurer l'étape d'idéation a également été relevé par le CSI Manager (I1) qui soulignait le besoin de mieux définir le problème à résoudre, de repasser par un processus d'abstraction. Cela passe par l'apprentissage de ce qu'est l'agriculture, de définir le contexte et l'environnement, la manière dont les agriculteurs travaillent pour ensuite définir la tâche à accomplir. En complément, le département d'analyse des opérations questionnait le fait que chaque idée amenée par les fondateurs donnait systématiquement lieu à un prototype puis à un produit commercialisé, sans considération d'aspects financiers comme le retour sur investissement. Ils souhaitent que le processus soit modifié en conséquence afin de débiter avec un ensemble d'idées filtrées par des critères menant à la sélection d'une ou plusieurs idées qui ont vocation à être développées. Il s'agit donc d'appuyer à la fois la génération d'un ensemble d'idées puis une sélection progressive pour converger vers quelques produits. Ces deux aspects sont retranscrits dans le **défi 14**.

Ces quatorze défis constituent l'étape 2 de notre démarche. L'étape 3 consiste à établir la cartographie des concepts et techniques actuellement employés par l'entreprise. Elle se base sur la cartographie établie au chapitre 6 complétée par l'ajout de concepts et techniques formulés au cours des nouvelles entrevues.

9.4 Établir la cartographie actuelle des concepts et techniques utilisés

Au cours des différentes entrevues, d'autres interlocuteurs ont ainsi pu partager des concepts et techniques supplémentaires qui sont venus compléter la cartographie initialement présentée au chapitre 6.

Premièrement, l'entrevue avec le département d'analyse des opérations (I10 et I11) a permis de préciser certains aspects et une prise de recul par rapport au développement. Sur la question de l'approche, peu de personnes dans l'équipe d'ingénierie ont pu l'exprimer. Le département d'analyse des opérations, par sa vision plus haut niveau, a établi trois principes que sont « value-based philosophy », « holistic view », « system thinking ». Le premier des principes

se réfère à la philosophie Lean qui a été expressément nommée. Les deuxième et troisième principes sont, de notre perspective, en lien avec l'IS, qui demeure non mentionnée. Cela tend à se rapprocher de la cartographie initiale présentée à la section 6.3.1, avec le LPD et l'IS. Pour conclure sur ces principes, les interlocutrices mentionnaient que le « system thinking » restait encore minoritaire au sein de l'entreprise.

Au niveau du processus, le flux de travail intégré au PDM a été rapporté étape par étape par plusieurs interlocuteurs du département d'ingénierie (I2, I4, I5, et I8) sans toutefois que le terme « Stage-gate » soit mentionné.

En lien avec les méthodes, le recours à la conception modulaire, initialement interprétée, a été expressément cité (I10 & I11). Nos interlocuteurs I6 et I9 ont également mentionné l'usage de lignes directrices – *guidelines* – et de listes de contrôle – *checklist* –, notamment utilisées pour la mise en production. En lien avec l'évolutivité du produit, l'un des fondateurs (I4) a mentionné l'emploi du « continuous improvement ». En complément, les interlocuteurs I4 et I8 ont mentionné la réutilisation de pièces de projets passés, ce qui est interprété comme l'utilisation du *reuse engineering*. Enfin, le recours au schéma de type essai et erreur est employé, mais reste critiqué (I6 et I8). Ce schéma de type essai et erreur semble piloter une partie importante du processus de développement, notamment les étapes de « concept » et de « prototype » précédant l'étape de « pre-production ». Selon notre compréhension, ces méthodes sont liées à des étapes du processus de type Étape-jalon.

Le *Design thinking*, décrit plus haut, semble être utilisé ici comme une méthode permettant de générer de nouvelles idées et d'améliorer la conception à travers l'observation d'utilisateurs opérant le produit. Néanmoins, le *Design thinking* reste à mettre en place et n'a donc pas encore contribué au développement de nouveaux produits multidisciplinaires. De la même manière, le CSI Manager (I1) nous a présenté sa vision de l'évolution du développement, comprenant l'usage de « set-based engineering » qui ne semble pas encore avoir été implémenté.

Le niveau outil peut être complété par le recours aux prototypes physiques comme outils du développement (I4), bien que leur usage actuel menant à de nombreux prototypes complets ne soit pas satisfaisant (I6 et I11). Les prototypes physiques semblent employés en lien avec l'essai et erreur, mais aussi afin de soutenir l'étape « prototype » du processus.

Ces différentes entrevues ont ainsi permis d'enrichir la cartographie présentée au chapitre 6. La cartographie actualisée est représentée par la Figure 9.3.

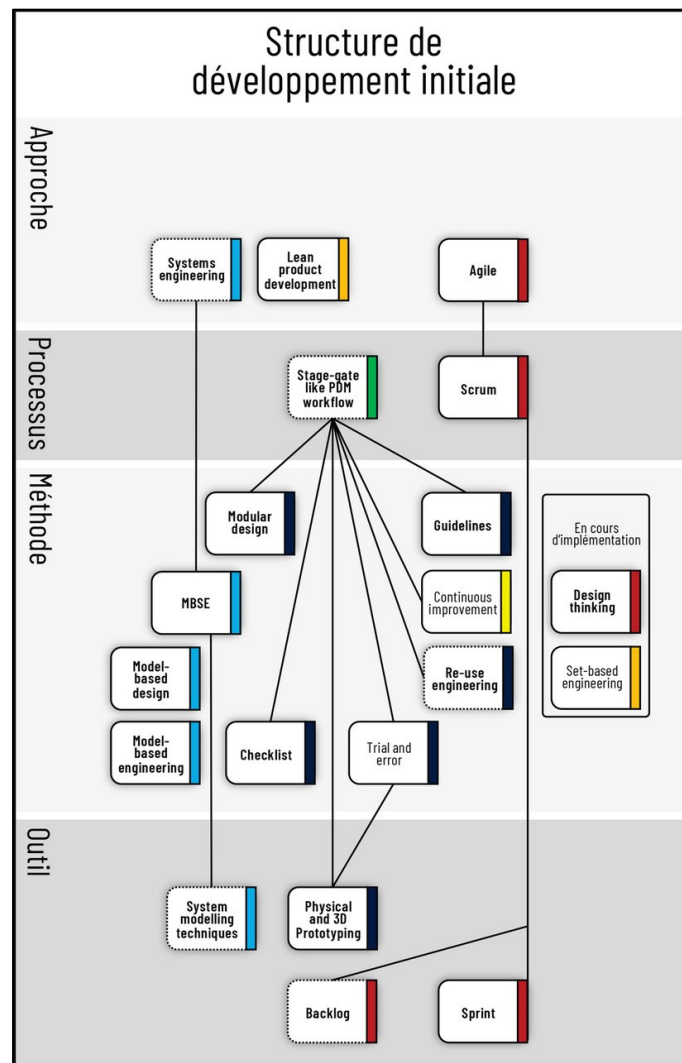


Figure 9.3 Structure de développement initiale de l'entreprise étudiée

9.5 Identifier les manques, les pistes d'amélioration et les objectifs

Une fois les défis identifiés et la cartographie établie, il est possible d'identifier les manques et les pistes d'améliorations. Cette section décrit l'étape 4 de notre démarche d'accompagnement, représentée par la Figure 8.2.

Tel que proposé au chapitre 8, il convient d'identifier les inadéquations et forces propres à la cartographie établie à l'étape précédente. Une des premières inadéquations relève d'un possible manque d'intégration entre deux fonctionnements avec, d'un côté, le CSI Manager (I1) qui emploie le MBSE, des techniques de modélisation système, Agile et ses concepts et techniques (identifiés par un rectangle rouge) et, d'un autre côté, le reste de l'équipe d'ingénierie qui s'appuie sur les concepts et techniques restants. Cela crée plusieurs structures verticales qui traduisent dans ce cas-ci de possibles silos.

Par la suite, l'étape 4 nous oriente vers l'identification des forces de la cartographie initiale par rapport aux défis soulevés. Il apparaît que certains défis bénéficient d'éléments de réponses possibles au sein de la cartographie actuelle. Les **défis 1, 2 et 3**, en lien avec la compatibilité du produit, ses multiples configurations, et son évolutivité dans le temps, sont en partie solutionnés par la conception modulaire et l'amélioration continue. Le **défi 5** est en partie solutionné par la conception modulaire, et le *reuse engineering*, dont l'usage doit être formalisé. Le **défi 7**, en lien avec une représentation interne du client et des validations intermédiaires, et le **défi 8** en lien avec le déroulement actuel et les itérations longues et coûteuses, peuvent bénéficier de Scrum, qui doit toutefois être étendu au reste du département d'ingénierie. Le **défi 11** en lien avec le maintien des connaissances peut en partie être solutionné par des pratiques basées sur les modèles et les techniques de modélisation système. Le **défi 12** peut également en bénéficier, mais les pratiques basées sur les modèles et les techniques de modélisation système doivent toutefois être étendues au-delà des modèles comportementaux du produit.

Il est ainsi possible de capitaliser sur certains de ces éléments, notamment l'implémentation des concepts et techniques en lien avec l'approche IS et des techniques de modélisation système qui vont dans le sens de l'appréhension de la complexité croissante du produit. De plus, une partie de la structure établie peut être conservée à l'exception du processus de type Étape-jalon qui doit être adapté ou remplacé. On observe en effet que la volonté d'intégrer une vue holistique et une pensée systémique, mentionnées précédemment par le département d'analyse des opérations, ne semble pas être portée par les processus actuels. Un décalage réside donc possiblement entre l'approche qui pourrait être mise en œuvre et le processus employé. Par ailleurs, le processus actuel de type Étape-jalon pourrait être une des causes des **défis 8 et 12**, respectivement en lien avec le déroulement actuel du développement qui est insatisfaisant et avec le travail en silo. Scrum pourrait quant à lui être conservé, car allant dans le sens des **défis 7 et 8**, tel que suggéré au paragraphe précédent.

Des manques et des pistes d'améliorations peuvent ainsi être identifiés. Parmi les manques identifiés, un processus commun, qui reste à déterminer, permettrait de faire converger les deux silos relevés précédemment. Par ailleurs, plusieurs défis demeurent non solutionnés, et ceux qui bénéficient d'éléments de solutions ne le sont pas totalement. En ce sens, il est nécessaire de sélectionner d'autres concepts et techniques pour venir compléter la réponse existante.

Parmi les pistes d'améliorations déjà envisagées, la constitution d'une « boîte à outils commune » sur laquelle chacun pourrait ajouter les « outils » qui lui conviennent a été formulée par le CSI Manager (I1). Ce dernier a également avancé d'autres pistes d'améliorations qui semblent constituer une feuille de route. Il envisage ainsi d'étendre l'usage du MBSE progressivement au reste de l'équipe. L'usage du MBSE et des techniques de modélisation permettront alors de modéliser une architecture commune au niveau système (le plus haut niveau). Ce modèle pourra ensuite être détaillé, et divisé en lots de travail. Des itérations seront conduites jusqu'à satisfaire les spécifications, puis des tests seront réalisés afin de vérifier l'atteinte des exigences. Cela semble traduire un fonctionnement proche de

celui du cycle en V. Enfin, tel qu'introduit précédemment, le *Design thinking* et le *set-based engineering* seront déployés.

L'étape 4 se conclut par l'identification d'objectifs, d'indicateurs et de valeurs cibles. Les objectifs n'ayant pu être mesurés, ils sont donnés à titre d'exemple. Nous pourrions alors citer la réduction du temps de développement de 30% comparé à la plateforme P3 (développée en 5 ans). Les réponses à chacun des défis peuvent être transcrites sous la forme d'objectifs auxquels sont attribués des indicateurs et des valeurs cibles. Par exemple, en lien avec le **défi 9**, un objectif serait de réduire le coût associé aux prototypes de 25%. En lien avec le **défi 4**, sur les caractéristiques du produit, il est possible de formuler des objectifs en lien avec la convivialité du produit, la facilité d'usage, la fiabilité ou encore la performance ciblée. Nous reviendrons sur les objectifs à la section 9.9 (étape 9). La section suivante exemplifie la sélection des concepts et techniques en lien avec les **défis 1, 6, 8 et 14**.

9.6 Sélection des concepts et techniques au sein des cartographies de la littérature scientifique

Les étapes précédentes ont permis de clarifier le contexte de l'entreprise, les défis, puis les manques et pistes d'amélioration en lien avec la cartographie actuelle. Cette section exemplifie l'étape de sélection (étape 5). L'association entre les défis et les concepts et techniques permettant d'y répondre partiellement ou totalement est synthétisée dans le Tableau 9.3. Le but de ce chapitre étant de démontrer l'applicabilité et la viabilité de nos travaux, nous ne détaillerons ici que la formalisation de l'approche avant de présenter la présélection des concepts et techniques en lien avec les **défis 8, 6 puis 1, et enfin 14**.

La formalisation de l'approche est un point de départ possible qui établit une direction quant aux choix des concepts et techniques. Bien qu'une approche unique aurait pu être sélectionnée au sein de nos cartographies, les discussions avec le département d'ingénierie et le département d'analyse des opérations semblent nous orienter vers une approche hybride plus représentative de ce vers quoi l'entreprise souhaite tendre. L'approche retenue est une combinaison de l'IS,

du LPD et d'Agile, tous trois présents sur nos cartographies de la littérature scientifique. L'approche hybride résultante intègre alors le « value-based » du LPD, l'aspect « holistique » et « la pensée systémique » de l'IS, ainsi que l'intégration du point de vue client et la flexibilité qui peut être retrouvés dans l'Agile. Cette approche hybride semble aller dans le sens des défis énoncés, notamment des **défis 4 et 12**.

Le cheminement permettant de converger vers une présélection de concepts et techniques répondant au **défi 8** est représenté par la Figure 9.4. Le **défi 8** aspire à dépasser le déroulement actuel du développement et questionne en ce sens le niveau processus. Afin d'orienter notre recherche parmi les cartographies, la réponse à ce défi doit idéalement soutenir la mise en application de l'approche. Dans notre cas, cela oriente notre recherche vers un processus pouvant intégrer Agile et IS – aucun processus LPD n'étant représenté au sein des cartographies. Ces processus hybrides entre Agile et IS sont indiqués dans nos cartographies par un rectangle violet. Tel que suggéré par la démarche, nous débutons par la cartographie de synthèse au sein de laquelle le processus *Scrum-MBSE* peut être relevé – Figure 9.4 étape (1). Toutefois, ce processus n'intègre pas la structure du cycle en V qui semble être ce vers quoi le CSI Manager souhaitait tendre – voir section précédente. Nos recherches ont donc été élargies aux cartographies des trois types de produits multidisciplinaires – Figure 9.4 étape (2) en vue d'identifier une hybridation se basant sur un cycle en V. La cartographie du développement mécatronique – Figure 5.7 – répertorie à ce titre le processus *V-model-Scrum*. L'intégration de Scrum au sein du cycle en V peut ainsi être explorée sur le modèle des travaux de Mule *et al.* (2020). Le choix de conserver Scrum s'explique par les cycles courts qui permettront d'éviter les longues itérations actuellement en place. Cette hybridation permet un développement plus méthodique et ainsi de répondre au **défi 8**. De surcroît, cette hybridation permet d'envisager une meilleure intégration, ce qui solutionnerait le problème actuel d'un fonctionnement en deux silos. Le *V-model-Scrum* est donc présélectionné comme solution possible au **défi 8** – Figure 9.4 étape (3). Enfin, dans une perspective plus large, le choix du processus ne s'appuie pas uniquement sur le **défi 8**, et doit être considéré au regard des autres défis. Dans notre cas, Scrum porte en partie l'intégration du point de vue client et répond alors partiellement au

défi 7. Par ailleurs, dans la logique du cycle en V, des tests sont d’abord effectués sur les composants individuels, puis sur les sous-ensembles, les ensembles, et enfin sur le produit au complet. Cela va dans le sens de la limitation du nombre de prototypes physiques complets exprimée à travers le **défi 9**. Ce processus hybride, de par sa structure en cycle en V, peut s’intégrer avec les pratiques basées sur les modèles déjà implémentées, telles que le MBSE, soutenues par les techniques de modélisation système. Enfin, afin de réaliser une architecture fonctionnelle entre la formulation des exigences et l’étape de « module design », nous proposons d’employer la décomposition et l’analyse fonctionnelle. Cette méthode ne répond pas directement à un défi, mais permet de mieux appréhender la décomposition au sein du processus de développement.

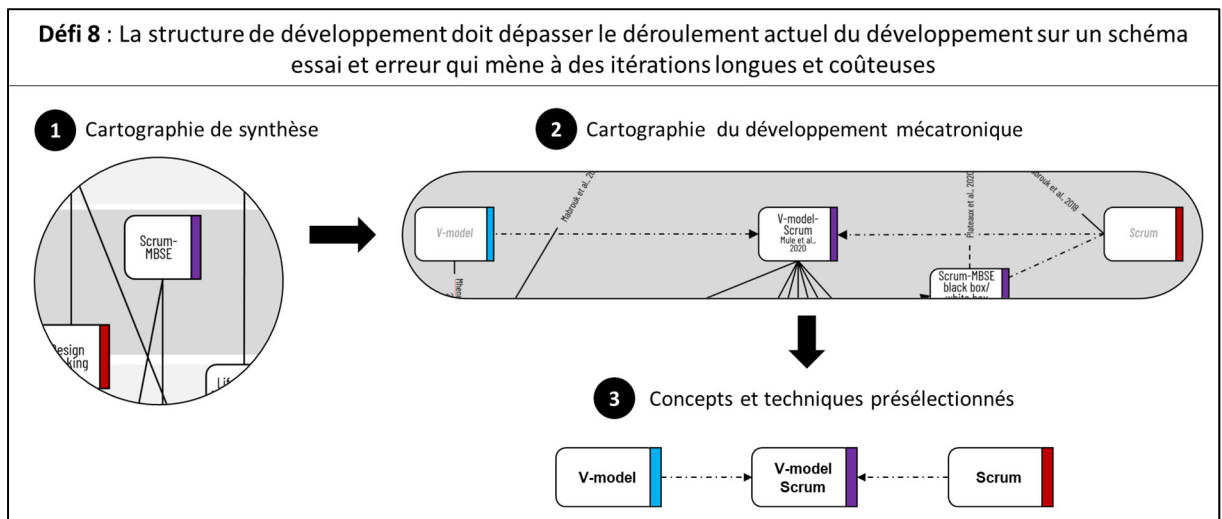


Figure 9.4 Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le **défi 8** en lien avec le déroulement du développement

Le **défi 6** cible un accompagnement de la formulation du besoin client et des exigences associées. Plusieurs techniques complémentaires peuvent être envisagées. Premièrement, au sein des cartographies de synthèse – Figure 9.5 étape (1) –, la QFD et les *user stories* peuvent être identifiés pour recueillir le besoin client. Le *Design thinking*, évoqué par le département d’analyse des opérations, pourrait être à nouveau utilisé au-delà de l’idéation. Ces techniques permettent de recueillir et de préciser les besoins. Afin d’organiser la formulation des besoins,

puis de les décliner en exigences, les techniques de modélisation système, et notamment le diagramme des exigences, peuvent être mis à contribution. L'emploi de ces techniques de modélisation système s'insère dans une perspective plus large, celle des pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles afin d'offrir une gestion et une traçabilité des exigences. En complément, afin d'outiller la QFD, et de mieux structurer la réponse au défi, nous nous sommes tournés vers la cartographie du développement mécatronique – Figure 9.5 étape (2). La Maison de la qualité (HoQ), permettant de se positionner en regard des solutions existantes sur le marché, peut ainsi soutenir la QFD. Enfin, devant l'enjeu de ce défi, nous avons jugé que les groupes de discussion – *focus group* – permettraient de solliciter un point de vue extérieur pour alimenter la QFD et/ou les *user stories*, et d'avoir un retour au long du processus de développement – Figure 9.5 étape (3). Ces différents concepts et techniques, dont certains forment des pans de structure, constituent notre présélection en regard du **défi 6** – Figure 9.5 étape (4). À noter que tous ces concepts et techniques ne seront pas nécessairement adoptés, et que les équipes pourront affiner ce choix.

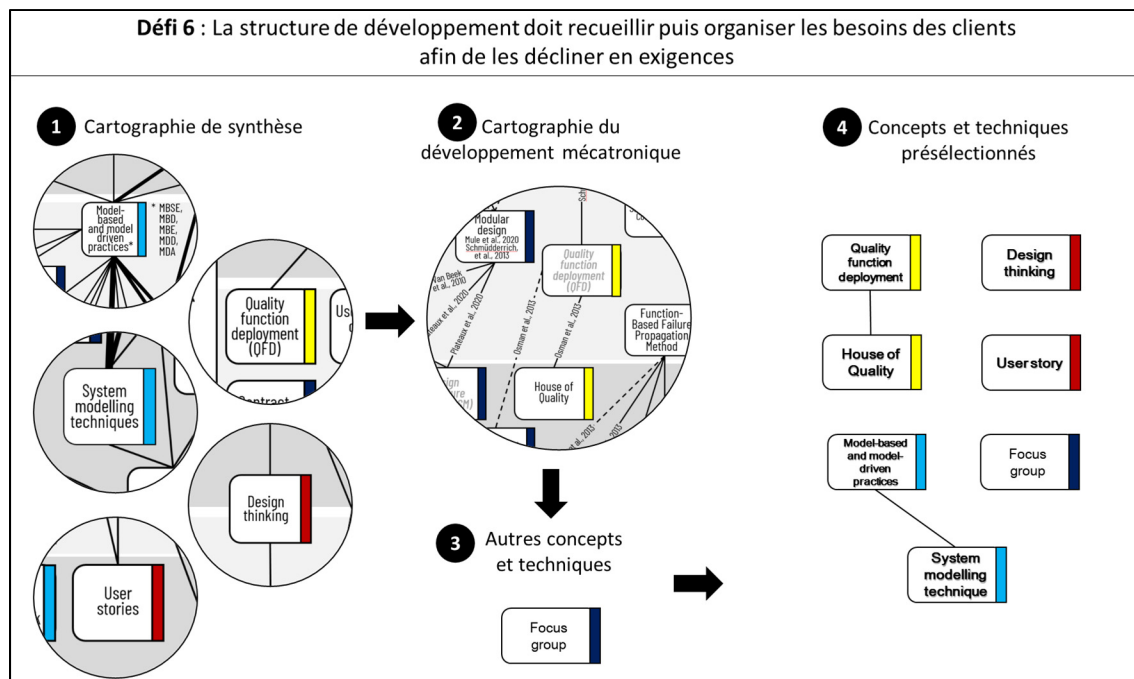


Figure 9.5 Exemple de la présélection de concepts et techniques pour le défi 6 en lien avec la formulation du besoin client et des exigences

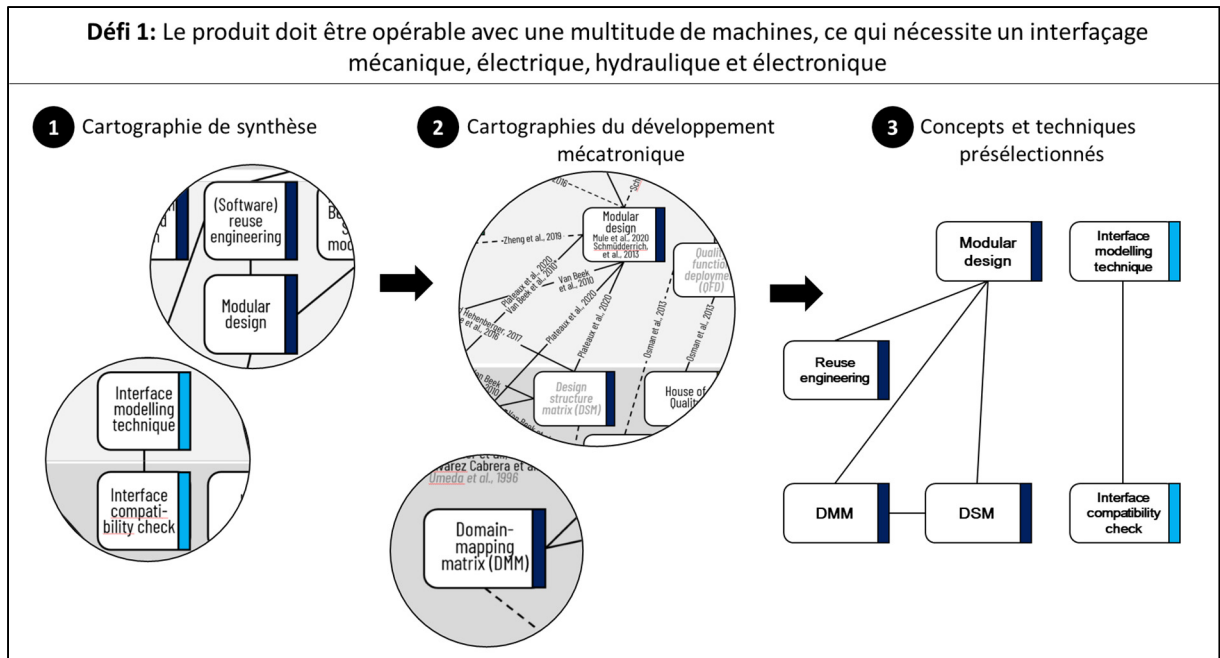


Figure 9.6 Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le défi 1 en lien avec la modularité du produit

Il apparaît que les **défis 1, 2, 3 et 5** peuvent en partie être résolus par une modularité du produit. Le **défi 1** a donc été choisi comme exemple supplémentaire afin de souligner qu'une technique, ici la conception modulaire, puisse répondre partiellement à plusieurs défis. Le **défi 1** révèle une notion d'interface et de compatibilité, pouvant mener au développement de plusieurs configurations. En ayant ces éléments en tête, il est possible de parcourir la cartographie de synthèse – Figure 9.6 étape (1) – qui nous amène à sélectionner la conception modulaire, ainsi que les travaux sur les interfaces que sont l'*interface modelling technique*, et dans une logique modulaire et évolutive, l'*interface compatibility check*. À noter que la définition de ces interfaces s'inscrit dans un modèle plus large du produit, et va dans le sens d'une analyse systémique de l'environnement du produit. En prévision du **défi 5**, en lien avec la réutilisation de pièces de projets passés, on notera également un lien entre le *reuse engineering* et la conception modulaire. Enfin, afin de mieux outiller la conception modulaire, nous étendons notre recherche aux autres cartographies – Figure 9.6 étape (2). La DSM a été identifiée à ce titre, et permet dans ce contexte de soutenir à la fois la modularité, mais aussi l'augmentation

de la complexité du produit. En complément, la *domain mapping matrix* (DMM), une matrice de transformation, peut être employée pour associer les composants de la DSM avec les modules. Ces différents concepts et techniques forment la présélection pour la réponse au **défi 1** – Figure 9.6 étape (3).

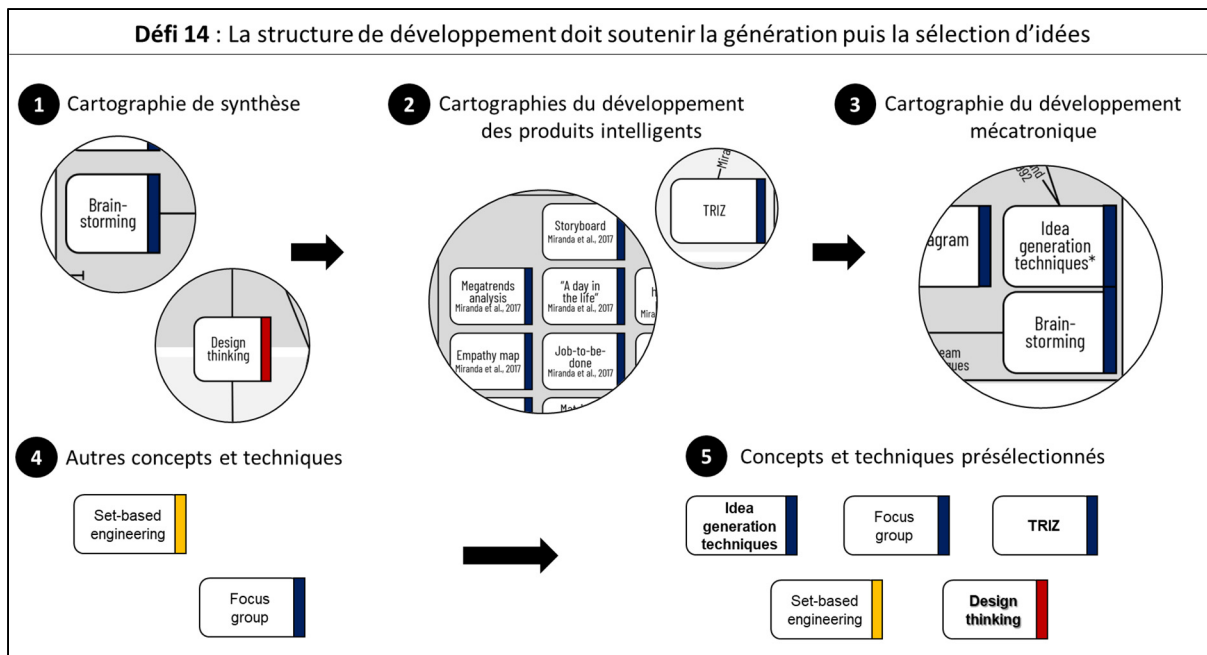


Figure 9.7 Exemplification de la présélection de concepts et techniques pour le **défi 14** en lien avec la génération et la sélection d'idées

Le **défi 14** est quant à lui représentatif d'une sélection amenant à parcourir plusieurs cartographies et à proposer l'usage de concepts et techniques non préconisés pour le développement de produits multidisciplinaires. Le **défi 14** transcrit le souhait du département d'analyse des opérations de mieux organiser à la fois la phase d'idéation et la manière dont les idées sont sélectionnées. Les cartographies sont parcourues en ce sens. Premièrement, sur la cartographie de synthèse – Figure 9.7 étape (1) –, le *Design thinking* et le remue-méninges – *brainstorming* – permettent de soutenir l'idéation. Toutefois, d'autres techniques complémentaires peuvent être explorées, et la sélection peut être étendue aux autres cartographies. Le développement de produits intelligents – Figure 9.7 étape (2) – en dénombre

plusieurs, tel que l'*empathy map*, l'analyse de tendance, ou encore TRIZ pour n'en citer que quelques-unes. La cartographie du développement mécatronique – Figure 9.7 étape (3) – comporte également un bloc regroupant différentes techniques de génération d'idées. Toutefois, ces concepts et techniques n'appuient pas ou peu la sélection des idées. D'autres concepts et techniques hors des cartographies peuvent alors être proposés – Figure 9.7 étape (4). Un fonctionnement de type *set-based engineering* pourrait être alors mis en place, dépassant le cadre de l'étape d'idéation (Hoppmann, 2009). C'est aussi ce qui avait été envisagé par le CSI Manager (I1). Par ailleurs, le choix du *set-based engineering* est ici éclairé par son alignement avec le LPD, en partie intégré à l'approche choisie. Enfin, les groupes de discussion – *focus group* –, dont l'usage a été proposé pour la formulation des besoins (**défi 6**), pourraient être mis à profit dans une logique d'innovation. Parmi ces concepts et techniques présélectionnés – Figure 9.7 étape (5) –, l'entreprise peut en explorer plusieurs jusqu'à déterminer lesquelles s'avèrent être les plus efficaces dans leur contexte et au sein de leurs équipes.

Nous avons ainsi détaillé au cours de cette section l'association entre des défis et des concepts et techniques. Cette association relève de la présélection. L'étape 5, conduite en deux temps, aborde ensuite la prise en compte de l'adoption à travers différentes considérations. Dans le cadre de l'étude de cas, la disponibilité du matériel de formation, les conditions limites d'application des concepts et techniques, leur convivialité ou encore leur temps d'apprentissage et de mise en œuvre ont été supposés satisfaisants et l'intégralité des concepts et techniques présélectionnés est donc considérée comme sélectionnée. Dans la pratique, l'entreprise ne retiendrait que les concepts et techniques qu'elle est susceptible d'adopter et de mettre en pratique. Par exemple, pour le **défi 14**, TRIZ pourrait ne pas être mise en œuvre, car nécessitant davantage de formation que d'autres concepts et techniques présélectionnés, tels que le remue-ménages.

Les concepts et techniques sélectionnés peuvent ensuite être organisés afin de générer la nouvelle structure de développement.

Tableau 9.3 Concepts et techniques solutionnant partiellement ou totalement les défis

Défis	Concepts et techniques apportant une solution aux défis
Défi 1 : Le produit doit être opérable avec une multitude de machines, ce qui nécessite un interfaçage mécanique, électrique, hydraulique et électronique.	Conception modulaire, <i>interface modelling techniques</i> , <i>interface compatibility check</i> , DSM, DMM
Défi 2 : Le produit doit être disponible en plusieurs tailles.	Conception modulaire
Défi 3 : Le produit doit pouvoir être évolutif et être amélioré chaque année.	Conception modulaire, Analyse de la valeur, <i>Continuous improvement</i> , <i>PDCA - Deming wheel</i>
Défi 4 : Le produit doit être simple à produire, offrir plus de valeur au client, tout en étant possiblement moins cher et en maintenant un niveau égal ou supérieur de performance, de fiabilité et de facilité d'usage par rapport à sa version antérieure.	IS, DfMA, Design for reliability, FME(C)A, Design for maintenance, Analyse de la valeur appuyée par le digramme FAST, Conception centrée utilisateur, <i>Design thinking</i>
Défi 5 : Le produit doit réutiliser au maximum les pièces des projets passés.	<i>Reuse engineering</i> , conception modulaire, pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles
Défi 6 : La structure de développement doit recueillir puis organiser les besoins des clients afin de les décliner en exigences.	QFD/HoQ, <i>user stories</i> , <i>focus group</i> , <i>Design thinking</i> , modélisation des exigences (dans <i>system modelling techniques</i>), traçabilité assurée par les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles
Défi 7 : La structure de développement doit internaliser la voix du client pour valider l'orientation prise par le produit au cours du développement.	Scrum, <i>backlog issues</i> des <i>user stories</i> , <i>focus group</i> .
Défi 8 : La structure de développement doit dépasser le déroulement actuel du développement sur un schéma essai et erreur qui mène à des itérations longues et coûteuses.	Hybridation de type <i>V-model-Scrum</i> , <i>sprint</i> (itérations contrôlées)
Défi 9 : La structure de développement doit permettre de réduire le nombre de prototypes physiques complets réalisés au cours du développement.	Cycle en V, prototypes virtuels, prototypes physiques, HIL/SIL/MIL, <i>test-driven development</i> , Techniques Taguchi
Défi 10 : La structure de développement doit contribuer à mieux intégrer développement et production, en prenant notamment en compte les contraintes de production lors des phases amont du développement.	DfMA, prise en considération des départements comme des étapes du cycle de vie dans le déroulement du cycle en V, ou comme parties prenantes dans la modélisation système
Défi 11 : La structure de développement doit permettre de maintenir des connaissances sur les produits et le développement.	KBE, pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles, techniques de modélisation système
Défi 12 : La structure de développement doit minimiser le travail en silo et améliorer ainsi la collaboration.	IS, Agile, architecture commune et modèle de niveau système par les pratiques basées sur les modèles et dirigées par les modèles, techniques de mod. système
Défi 13 : La structure de développement doit permettre un développement concourant tout en maintenant les possibilités de créativité.	Notion d'interfaces et de modules simplifiant le travail en parallèle
Défi 14 : La structure de développement doit soutenir la génération puis la sélection d'idées.	Techniques d'idéation, TRIZ, <i>set-based engineering</i> , <i>focus group</i> , <i>Design thinking</i>

Figure 9.8 Proposition d'une structure de développement pour l'entreprise étudiée sur la base du modèle APMO

9.7 Générer une nouvelle structure sur la base des concepts et techniques sélectionnés

Cette section, sur la base des concepts et techniques sélectionnés, présente la génération de la nouvelle structure de développement (étape 6) qui doit permettre de répondre aux défis mentionnés. Cette structure a été déterminée *a posteriori* du développement de la plateforme P3, et pourrait être employée pour le développement d'une plateforme similaire ou de la prochaine plateforme P4, à la condition que les défis demeurent similaires.

L'étape 5 a mené à la sélection de concepts et techniques, parfois prenant la forme de pans de structure de développement. Hormis l'essai et erreur et le processus de type Étape-jalon, les concepts et techniques de la structure initiale ont été conservés. Afin de construire la cartographie, nous avons débuté par l'approche (étape 6.1), puis le processus (étape 6.2), avant de positionner les méthodes (étape 6.3) et les outils (étape 6.4) sur leurs niveaux respectifs. Par la suite, les liens identifiés lors de la sélection (voir section précédente) ont pu être rapportés sur la cartographie – en trait continu –, et des liens opérationnels supplémentaires ont également pu être établis – en trait interrompu (étape 6.5).

Ces étapes ont permis de converger vers une nouvelle structure de développement représentée par la Figure 9.8. Les concepts et techniques dont la police est en gras peuvent être retrouvés au sein des cartographies de la littérature scientifique et constituent une part importante de la structure de développement. En complément, des concepts et techniques qui ne sont pas présents sur les cartographies de la littérature scientifique ont été inclus et sont identifiés par une police simple. La section suivante propose de positionner les méthodes et outils sur les étapes du processus hybride choisi.

9.8 Positionner les méthodes et outils sur les étapes du processus

Sur la base de la structure de développement représentée à travers la cartographie, il est possible d'établir une représentation qui positionne les méthodes et outils sur chacune des étapes du processus. Cette section exemplifie l'étape 7.

La Figure 9.9 représente graphiquement l'approche hybride IS-Lean-Agile au sein de laquelle est positionné le processus hybride cycle en V-Scrum. Ce dernier est à son tour opérationnalisé sur chacune des étapes par différentes méthodes et outils. On retrouve alors un cycle en V précédé d'une étape d'idéation. Scrum est positionné le long de la branche descendante du cycle en V et sur l'étape de « component design ». Les méthodes et outils ont été positionnés sur les étapes où ils pourraient apporter une valeur ajoutée, mais leur utilisation n'est pas restreinte à ces étapes. La mise en œuvre des différentes techniques permettra par la suite aux équipes de se les approprier et de les utiliser quand cela est nécessaire. Des techniques utilisées individuellement pourraient également être ajoutées. Ainsi, sur la partie « component design », où les différentes disciplines conçoivent leurs solutions, d'autres concepts et techniques pourraient être ajoutés à l'avenir. Cette instanciation pourra par la suite évoluer en fonction des projets et de l'évolution du contexte de l'entreprise.

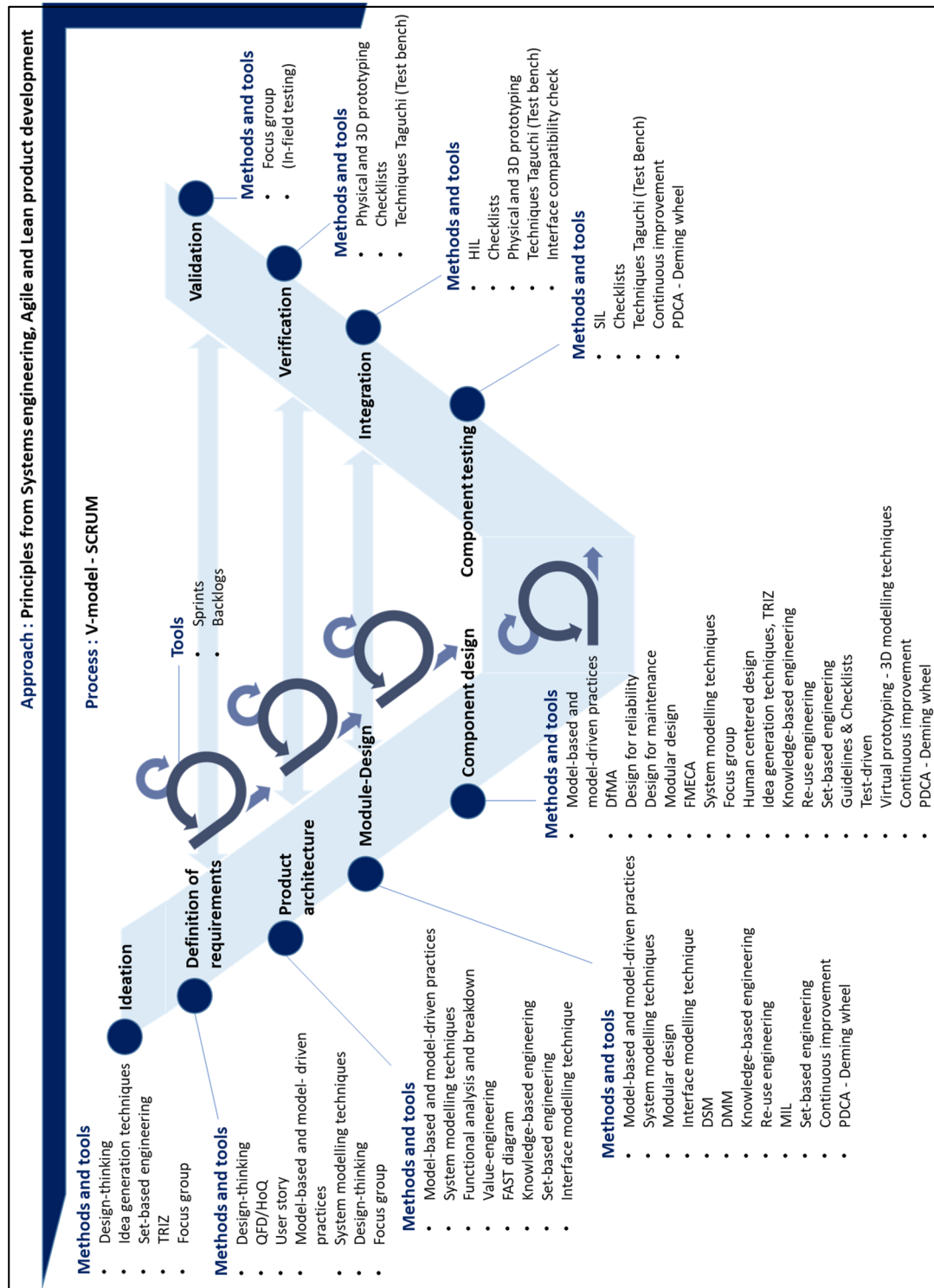


Figure 9.9 Positionnement des méthodes et outils sur les étapes du processus pour accompagner le développement d'un équipement agricole de nouvelle génération

9.9 Transfert à l'entreprise pour implémentation

Pour clôturer ce cas d'application, notre visite s'est conclue par une présentation à l'équipe de recherche et développement et à la direction générale sur l'intégration d'une partie de cette structure de développement. Nous avons également partagé le cours d'IS traduit en anglais qui est dispensé à l'Université de technologie de Compiègne afin d'accompagner la montée en compétence des équipes. Un atelier avait également été réalisé avec nos interlocuteurs I1, I2 et I9, sur l'application de l'approche IS et du cycle en V à travers un cas simplifié permettant de dérouler la branche descendante du cycle en V avec eux, cela afin qu'ils puissent aller dans le sens de l'implémentation d'un **ensemble** IS. Cette action cherche à initier l'étape 8 de notre démarche et à favoriser l'adoption à travers du matériel de formation. En complément, un projet pilote pourrait être réalisé afin d'implémenter la structure proposée et se familiariser avec les différents concepts et techniques. L'entreprise semble avoir déjà adopté ce type de fonctionnement par le passé. À ce titre, un projet pilote portant sur la caisse de transport de la plateforme P3 avait été développé en 6 semaines. Ce projet pilote avait permis d'explorer la mise en œuvre du *set-based engineering*, l'appui des outils informatiques pour la conception (CAO 3D), la réalisation de prototypes physiques uniquement pour des « sous-systèmes », mais également une conception modulaire permettant d'inclure les variantes du produit. Le projet avait été considéré comme un succès.

Sur la mesure de l'efficacité – étape 9 –, une des limitations soulevées demeure le manque de données et d'indicateurs pour pouvoir mesurer l'atteinte des objectifs. Des feuilles de temps ont été utilisées à partir de la variante P3.2 – Figure 9.2. Auparavant, il ne semblait pas y avoir de données sur le temps de mise sur le marché précis ou encore de calcul de retour sur investissement sur les anciennes plateformes – un ordre de grandeur était cependant disponible. En ce sens, la plateforme P3, développée en 5 ans, peut servir de comparaison avec le développement de la future plateforme. Néanmoins, malgré l'absence d'indicateurs les équipes avaient constaté qualitativement l'effet positif de l'introduction du logiciel de CAO 3D et le PDM associé sur le développement de la plateforme P3. D'une manière quantitative, le temps

de développement avait été réduit de 2 ans par rapport à l'ancienne plateforme. Nous espérons donc que cette structure de développement, même si évaluée qualitativement, aura également un effet positif sur le développement de la future plateforme. Des indicateurs peuvent également être mis en place sur chacun des défis précédemment énoncés. L'efficacité de notre démarche serait alors évaluée en regard du nombre de défis solutionnés.

En pratique, si le projet pilote démontre une amélioration satisfaisante, justifiant un coût-bénéfice intéressant, cette nouvelle structure de développement peut être étendue au reste du département d'ingénierie et devenir la nouvelle liste de concepts et techniques préconisés à l'interne, permettant d'accomplir l'étape 10.

L'amélioration des pratiques de développement doit être perçue comme évolutive, et des ajustements pourront être conduits sur les concepts et techniques en fonction des projets à développer et des défis identifiés. Ces ajustements se traduiront par la sélection de nouvelles pratiques pour appuyer certains défis spécifiques (*p. ex.* idéation, appréhension de la complexité, modélisation).

9.10 Synthèse de l'application de nos travaux sur un cas industriel

Ce chapitre a permis de démontrer la viabilité et l'applicabilité de notre démarche et la manière dont elle peut accompagner une entreprise ayant un héritage monodisciplinaire dans l'évolution de ses pratiques de développement en parallèle de l'évolution de ses produits vers des produits multidisciplinaires. L'accent a été mis sur l'application des étapes pour lesquelles nos travaux se distinguent, et plus particulièrement sur la sélection de concepts et techniques à partir des cartographies de la littérature scientifique, ainsi que sur la génération d'une nouvelle structure de développement qui en résulte.

L'exemplification de l'étape de sélection a permis, d'une part, de démontrer comment nos cartographies de la littérature scientifique peuvent être mises à profit afin de naviguer dans le

corpus scientifique – premier critère d’évaluation. D’autre part, l’association entre des défis et des concepts et techniques les solutionnant suggère une manière de guider les entreprises dans la sélection des concepts et techniques appropriés à leur développement – deuxième critère d’évaluation. Enfin, la résolution de ces défis pris individuellement et la constitution d’une nouvelle structure de développement bénéficiant d’une plus grande variété permettent d’envisager une amélioration globale de la performance du développement. Cette amélioration suggère que la démarche d’accompagnement peut être considérée comme utile pour les industriels – troisième critère d’évaluation.

Ce cas d’application chez un industriel tend à confirmer que notre démarche apporte une réponse viable à notre objectif principal qu’est de **permettre aux entreprises d’identifier et de structurer un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l’évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires**. Enfin, l’application de notre démarche en contexte industriel a également permis de soulever certaines limites, et d’entrevoir de possibles perspectives, qui sont discutées au chapitre suivant.

CHAPITRE 10

DISCUSSION, LIMITES ET PERSPECTIVES

Les chapitres précédents ont permis de proposer un modèle pour la structuration du développement en quatre niveaux, puis de répondre à nos différents objectifs spécifiques menant à la proposition d'une démarche d'accompagnement des entreprises qui a pu être mise en œuvre sur un cas concret. Les limites, la validité et enfin les perspectives liées à ces différentes contributions sont discutées ci-après.

10.1 Le modèle APMO en quatre niveaux : limites et perspectives

Le travail de cartographie réalisé à la fois pour la littérature scientifique et pour les pratiques industrielles s'appuie sur la proposition d'un modèle en quatre niveaux, dénommé APMO en référence aux quatre niveaux que sont approche, processus, méthode et outil. Chacun de ces niveaux a été défini, ce qui a permis d'établir un arbre de décision pour un classement systématique. Ce modèle permet d'organiser la pluralité de concepts et techniques constatée au sein de la littérature scientifique, en reconsidérant parfois la terminologie qui leur était attribuée.

Le classement des concepts et technique et son caractère systématique peuvent être discutés. En effet, bien que le classement soit appuyé par l'arbre de décision qui procure une certaine systématisme, la réponse aux questions comporte toujours une part d'interprétation. Il ne peut pas être exclu que d'autres chercheurs, ayant une lecture différente, puissent arriver à un classement différent. Toutefois, nous pensons avoir identifié les cas qui étaient sujets à discussion et leur classement a été expliqué. De même, pour les liens réalisés entre les concepts et techniques au sein de la cartographie de la littérature scientifique, le niveau d'interprétation transparait à travers la distinction entre les traits continus et interrompus. Ces éléments permettent de penser que les cartographies pourraient être reproduites, à quelques détails près,

par d'autres chercheurs qui s'appuieraient sur le logigramme. Il serait toutefois fort intéressant de confirmer le caractère systématique de la démarche en confiant à d'autres chercheurs la tâche de refaire la classification à partir de la même littérature, mais à travers leur propre interprétation.

Aussi, à travers l'usage du modèle APMO, une piste d'amélioration a été identifiée afin de rendre le modèle davantage en phase avec la réalité observée. En effet, il ressort que certains chercheurs (Zheng *et al.*, 2014 ; Paetzold, 2017), mais aussi certains industriels de notre échantillon, semblent distinguer deux niveaux de processus, avec le niveau macro et le niveau micro. Le niveau macro est alors le processus couvrant l'intégralité du développement, et le niveau micro, est principalement employé pour appuyer le travail des équipes d'une manière plus fine. Par exemple, Scrum est parfois employé pour organiser le développement à l'échelle d'une semaine ou d'un mois, pouvant s'intégrer dans une perspective plus large, comme dans le cas de l'hybridation *V-model-Scrum*. Cette nuance pourrait être ajoutée au modèle APMO.

10.2 Cartographie de la littérature scientifique : limites et perspectives

La cartographie de la littérature scientifique a permis de représenter une variété de concepts et techniques. Les résultats de l'analyse de ces cartographies soulèvent certains éléments de discussion et perspectives de recherche.

L'analyse de nos cartographies est tournée vers l'identification de structures ou pans de structure pour permettre aux entreprises d'appuyer le développement de leurs produits multidisciplinaires. Néanmoins, on observe au sein des cartographies que certaines approches ne sont pas opérationnalisées, ou encore ne constituent pas un **ensemble** au sein de nos cartographies. C'est le cas par exemple de l'approche Agile qui dispose de peu de méthodes et d'outils. Ainsi, une perspective de recherche serait d'élargir l'examen de la littérature à d'autres types de produits multidisciplinaires, par exemple la robotique, en se focalisant sur les approches qui accusent un manque de méthodes ou d'outils pour soutenir leur

opérationnalisation. Il serait également pertinent d'explorer des concepts et techniques non préconisés pour le développement de produits multidisciplinaires. L'exploration de cette dernière piste a été débutée par l'une de nos publications à travers l'identification de critères permettant de considérer l'usage de concepts et techniques non préconisés dans un contexte de développement de produits multidisciplinaires (Guérineau *et al.*, 2018).

Par ailleurs, on peut s'interroger sur la pertinence pour les industriels de réaliser une distinction entre les trois types de produits multidisciplinaires discutés (mécatroniques, SCP et intelligents). En effet, à haut niveau, on observe sur les cartographies que les concepts et techniques proposés pour leur développement sont comparables à travers la présence commune des techniques de modélisation système, des pratiques basées et dirigées par les modèles, et plus largement de l'**ensemble** l'IS présent au sein des cartographies des trois types de produits multidisciplinaires. Ainsi, pour les industriels, cette distinction pourrait ne pas être significative. On notera en complément que les industriels interrogés n'ont par ailleurs pas spontanément qualifié leurs produits avec l'une de ces trois dénominations. Il serait alors intéressant de documenter spécifiquement l'importance de cette distinction entre les trois types de produits du point de vue des industriels.

Il ressort de notre analyse que deux approches et leurs concepts et techniques respectifs sont majoritairement discutés, soient l'IS et Agile. Les deux approches portent des philosophies bien distinctes avec, d'une part, l'IS dont l'accent est mis sur l'appréhension de la complexité à travers un développement structuré et systématisé et, d'autre part, avec Agile où l'accent semble centré sur les acteurs (utilisateurs et concepteurs), à travers un développement itératif et perçu comme flexible. En considérant nos travaux dans leur globalité, l'IS bénéficie d'un consensus au sein de nos cartographies de la littérature scientifique, là où Agile semble prédominant dans la pratique industrielle. Une perspective de recherche apparaît sur la manière de rendre l'IS plus « agile », et comment mieux appréhender la forte complexité au sein d'Agile. Une réponse possible résiderait dans leur hybridation, explorée par quelques auteurs,

mais qui nécessiterait d'être davantage explorée afin de mieux l'opérationnaliser, notamment au niveau méthode – voir Figure 5.7.

Toujours en lien avec l'analyse des résultats, il apparaît que la littérature propose un nombre important de concepts et techniques pouvant être implémentés pour le développement de produits multidisciplinaires – plus de 200. Toutefois, tous ne peuvent pas être considérés de la même manière et la pertinence de certains travaux vieux de plus de 25 ans peut être questionnée. Nous avons également posé l'hypothèse que les concepts et techniques préconisés par la littérature peuvent être mis en œuvre par les industriels. Idéalement, cette hypothèse gagnerait à être vérifiée par de futurs travaux. Soulignons cependant que nous avons introduit la notion de consensus et de densité, appuyés des indicateurs du même nom, afin de guider les entreprises vers des concepts et techniques préconisés par plusieurs références (limitant le risque quant à leur application). Toutefois, nos indicateurs semblent sensibles aux modifications pour les niveaux disposant de peu de blocs, pouvant créer une illusion de consensus. C'est par exemple le cas du niveau approche des SCP, où l'ajout de quelques références a une influence notable. En ce sens, dans une perspective d'évolution de nos travaux, d'autres indicateurs pourraient être proposés.

Les cartographies présentées sont le fruit d'un effort de recherche important basé sur une analyse approfondie de chacun des articles. Il apparaît toutefois que ces cartographies sont un « instantané » de la littérature scientifique, et sont donc figées dans le temps. Afin d'y remédier, une possibilité pourrait être de transférer les informations contenues dans les cartographies vers une représentation dynamique, navigable et collaborative, par exemple, en utilisant le WebVOWL (Lohmann *et al.*, 2016). Le résultat prendrait alors la forme d'une ontologie collaborative permettant aux chercheurs et aux industriels d'y ajouter des concepts et techniques, des liens, et d'y effectuer des requêtes. La création d'une « base de concepts et techniques » permettrait également de dépasser une autre limite qu'est la recherche de concepts et techniques au sein de nos cartographies, actuellement limitée au nom des concepts et techniques. Les requêtes s'appuieraient sur une caractérisation des différents concepts et

techniques. Cette caractérisation pourrait être faite par exemple sur le modèle des caractéristiques répertoriées dans la modélisation des méthodes proposée par Birkhofer *et al.* (2002) ou Braun et Lindemann (2003), ou encore par une caractérisation associant les concepts et techniques avec des défis qui restent à déterminer.

10.3 Analyse des pratiques industrielles : limites et perspectives

En complément du volet littérature scientifique, nos travaux comportent également un volet pratiques industrielles, qui mène à la réalisation d'une cartographie du même nom, ainsi qu'à l'analyse des modalités de sélection et d'adaptation des pratiques industrielles en matière de développement de produits.

Afin de discuter de nos résultats, nous revenons sur les études de Gendron *et al.* (2011) et de Hollauer, Kattner et Lindemann (2016), présentées au chapitre 3. Gendron *et al.* (2011) ont relevé que 60 % des entreprises interrogées utilisent un processus. L'étude de Hollauer *et al.* (2016) souligne que 4 des 5 PME interrogées et 8 des 14 *start-ups* mentionnent un processus. Ces études se basent aussi sur un mode déclaratif et répertorient les processus « mentionnés et utilisés ». Dans notre cas, 5 entreprises sur les 10 interrogées « mentionnent et utilisent » un processus, auxquelles s'ajoutent 2 entreprises qui ne « mentionnent pas mais qui utilisent » un processus, ce qui semble aller dans le sens des résultats constatés par Gendron *et al.* (2011) et Hollauer *et al.* (2016). Pour les méthodes et outils, Gendron *et al.* (2011) ont observé que seulement 27% des entreprises interrogées déclarent utiliser des méthodes, des outils et des techniques, là où notre étude révèle que l'ensemble des entreprises de notre échantillon mentionnent et utilisent au moins une méthode ou un outil. Cette comparaison avec deux autres études semble conforter nos résultats.

Par ailleurs, il ressort de nos cartographies des pratiques industrielles que des entreprises utilisent des concepts et techniques sur les quatre niveaux. Toutefois, il demeure qu'une partie des entreprises ne mentionnent pas de concepts et techniques sur chacun des quatre niveaux,

ce qui nous amène à nous interroger sur la mise en pratique du modèle APMO et dans quelle mesure il est adapté pour modéliser la structure de développement employée. Pour ces entreprises, il est nécessaire de distinguer des concepts et techniques « non mentionnés mais utilisés » et les concepts et techniques « non mentionnés et non utilisés ». Nous défendons que notre modèle reste valide, notamment du fait que certains concepts et techniques non mentionnés mais utilisés ont pu être relevés à travers l'entrevue. Par ailleurs, en prenant l'exemple du niveau processus, il nous apparaît peu probable que les entreprises n'ayant pas mentionné de processus n'utilisent pas une suite d'étapes ordonnées pour conduire leur développement. Cependant, cette distinction entre « non mentionné mais utilisé » et « non mentionné et non utilisé » nous amène à discuter de la difficulté de documenter des manques de structuration et de variété au prochain paragraphe.

L'analyse des concepts et techniques conduite au chapitre 6 et la comparaison au chapitre 7 se basent sur l'analyse de la cartographie des pratiques industrielles, et ont permis d'identifier des manques possibles de structuration et de variété. D'autres auteurs ont également constaté des manques de variété et de structuration (Albers *et al.*, 2014 ; Nijssen et Frambach, 2000 ; López-Mesa, 2003). Cela relève potentiellement d'une limite du mode déclaratif des entrevues qui ne nous permettent pas de savoir avec précision s'il s'agit de concepts et techniques « non mentionnés et non utilisés », « non mentionnés et utilisés », ou encore plus simplement d'une omission. En ce sens, des recherches complémentaires pourraient être menées afin de clarifier cet aspect, et nous amènent à discuter des limites méthodologiques.

En termes de méthodologie, il a été fait le choix de s'appuyer sur des entrevues semi-dirigées afin d'explorer la manière dont les développements de produits multidisciplinaires sont réalisés. L'entrevue se base ainsi sur un mode déclaratif qui implique que certains éléments ont pu être omis, ou peuvent diverger de la définition et de l'application des concepts et techniques telles que décrites au sein de la littérature scientifique. Un exemple notable est celui d'Agile et de Scrum, où il apparaît dans certains cas une confusion en qualifiant le processus d'Agile, alors qu'en réalité, et de par les outils formulés, il s'agirait davantage d'un processus

Scrum intégré dans une approche Agile (Entreprises « B », « H » et « I »). Les données collectées dépendent fortement des connaissances des personnes interrogées en matière de concepts et techniques. Afin de pallier à cette situation, une distinction a été introduite entre les concepts et techniques expressément mentionnés et utilisés, et ceux qui, d'après les descriptions de nos interlocuteurs, sont également utilisés (« non mentionnés mais utilisés »). Cette distinction introduit une interprétation qui, au même titre que pour nos cartographies de la littérature scientifique, est indiquée dans nos résultats.

Pour l'analyse des données collectées lors des entrevues, et malgré les éléments soulevés au paragraphe précédent, il a été considéré que les concepts et techniques « mentionnés et utilisés », ainsi que les concepts et techniques « non mentionnés mais utilisés », le sont sans trop de déviation par rapport à leur application théorique, même si certains éléments ont pu être adaptés. Nous sommes ainsi restés factuels, et l'usage des concepts et techniques mentionnés n'a pas été contesté. En effet, comme le souligne Spitas, en raison d'une certaine fierté de la part de l'industrie à l'égard des pratiques mises en œuvre, « it seems unlikely that answers might be falsified or otherwise extensively biased, although, in principle, the possibility cannot be ruled out » (Spitas, 2011). Une avenue envisageable pour augmenter la confiance dans les déclarations collectées serait une validation croisée avec d'autres techniques de collecte de données telles qu'une analyse de documents internes, ou encore la conduite d'entrevues supplémentaires ou une étude de cas.

En lien avec la perspective de conduire une étude de cas pour documenter les pratiques industrielles, la cartographie réalisée au chapitre 6 et celle réalisée au chapitre 9 pour l'entreprise « G » peuvent être comparées afin de comprendre les limites des entrevues. Il apparaît que l'étude de cas offre une vision plus fidèle de la structure de développement, mais a nécessité presque autant d'entrevues (11 entrevues) que l'intégralité des entrevues conduites pour le chapitre 6 (12 entrevues).

Enfin, selon une étude menée par Van Dijk (1995), qui cherche à évaluer sa proposition, le chercheur considère que « six persons is generally regarded as a sufficient number for an initial qualitative evaluation ». Notre échantillon de dix entreprises peut s'avérer suffisant pour avoir une idée représentative de la manière dont les entreprises développent leurs produits et ont modifié leurs pratiques, mais les résultats ne sont pas généralisables.

10.4 La démarche d'accompagnement : limites et perspectives

La démarche d'accompagnement proposée permet de créer ou d'enrichir la « boîte à outils interne » de l'entreprise, allant dans le sens des recommandations de Nijssen et Frambach (2000) et Albers *et al.* (2014). L'application de la démarche doit être intégrée, selon nous, dans une perspective d'amélioration continue. En effet, d'une manière générale, nous défendons que l'efficacité et l'usage des concepts et techniques, mais également la structure de développement, devraient être régulièrement réévalués par les entreprises, en raison de l'évolutivité du contexte de développement et des produits. L'application de la démarche peut ainsi être perçue comme incrémentale et itérative. Le déploiement d'une variété plus importante de concepts et techniques peut alors être réparti sur plusieurs projets pilotes puisque le changement de pratiques de développement peut être long à conduire. D'ailleurs, au sein de notre échantillon, la démarche menée par les entreprises « G » et « H », qui se sont distinguées au chapitre 6 par une réflexion approfondie, correspond à un effort de plusieurs mois, voire d'années.

Une dernière limite à mentionner concerne la validation de nos travaux. La validation « idéale » ne pouvant être conduite, nos travaux ont été évalués par la combinaison d'une étude de cas complétée par une argumentation. L'argumentation est une évaluation valable, mais reste considérée comme « faible », car pouvant facilement être biaisée par les intérêts des chercheurs (Johannesson et Perjons, 2014). En ce sens, l'étude de cas vient renforcer notre évaluation. Sa réalisation a permis de démontrer la viabilité et l'applicabilité de nos travaux et de les évaluer positivement au regard de trois critères. Tel que souligné par Blessing et

Chakrabarti (2009) et Wieringa (2009), l'application de la solution proposée par les chercheurs eux-mêmes est tout à fait valide, mais soulève plusieurs limites. En ce sens, il n'est pas possible de tirer des conclusions au-delà de l'étude de cas, ce qui empêche toute généralisation (Blessing et Chakrabarti, 2009 ; Johannesson et Perjons, 2014). De plus, un possible biais de la part des chercheurs ne peut être écarté.

Afin de mitiger ce biais et la subjectivité associée, les cartographies de la littérature scientifique ont été présentées à des industriels à deux reprises. Le 24 novembre 2020 au cours d'un atelier de la Société des Ingénieurs de l'Automobile (France) et le 1^{er} juillet 2021 pendant les Entretiens du Management de Projet (France). Ces présentations se sont conclues avec des retours très positifs, et les industriels semblent démontrer un réel intérêt pour ce type de travaux. En complément, au cours de notre étude de cas, une présentation de notre modèle APMO a été faite au département d'analyse des opérations. Notre interlocutrice I11 nous avait alors confié qu'elle trouvait le modèle en quatre niveaux « structuring and logical ». Un commentaire similaire avait été formulé lors de la présentation de ce modèle à DESIGN2018 par une personne de chez Jaguar-Land Rover, témoignant d'un retour positif sur nos travaux.

10.5 Synthèse de la discussion

Ce chapitre a permis de discuter notre démarche et nos principales contributions, et d'identifier leurs principales limites et perspectives qui se positionnent comme des pistes pour la suite de nos travaux. Une partie de ces perspectives viennent répondre à plusieurs limites soulevées et s'appuient ainsi sur la conduite de nouvelles études en lien avec la pratique industrielle par d'autres types de collecte de données, tels que des entrevues plus ciblées, ou des études de cas complémentaires. D'autres perspectives viennent élargir l'horizon de nos travaux, notamment la caractérisation des concepts et techniques et la création d'une représentation dynamique et requêtable qui nous apparaissent toutes deux comme des opportunités convergeant vers un meilleur accompagnement des entreprises.

CONCLUSION

Nos travaux s'inscrivent dans ce que nous avons qualifié d'**ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire**. Cette ère, à travers les technologies mises en œuvre, induit de profonds changements au sein du paysage industriel. Ce contexte de transformation et les défis qui y sont liés nous ont amenés à étudier la manière dont les entreprises peuvent faire évoluer leurs pratiques de développement afin de mieux piloter l'évolution des produits vers des produits multidisciplinaires. Les prochains paragraphes reviennent sur la manière dont nos travaux et nos différentes contributions ont permis de converger vers une réponse à notre objectif d'accompagnement des industriels dans cette évolution.

Une première contribution de nos travaux a été la proposition du modèle APMO et de l'arbre de décision associé pour la structuration du développement en quatre niveaux. Cette contribution apporte une réponse à la variabilité observée au sein de la littérature dans l'usage des termes. En effet, le modèle APMO permet de structurer les différents types de concepts et techniques décrits par la littérature et propose un moyen de les classer systématiquement. L'ajout du niveau approche par rapport aux modèles en trois niveaux a cherché à dépasser le niveau processus par l'analyse de plusieurs approches et structures associées. Pour les entreprises, ce modèle en quatre niveaux trouve un parallèle avec les niveaux stratégiques et décisionnels et vise à mieux organiser leur développement. Pour les chercheurs, ce modèle et l'arbre de décision peuvent permettre de classer/qualifier leurs futures propositions.

Sur la base du modèle APMO, une deuxième contribution réside dans la réalisation de cartographies de la littérature scientifique qui organisent graphiquement le corpus scientifique traitant du développement de trois types de produits multidisciplinaires que sont la mécatronique, les SCP et les produits intelligents. Ces cartographies proposent une vue d'ensemble à travers les approches, processus, méthodes et outils, mais aussi de leurs liens, permettant une analyse approfondie de la littérature scientifique. Ces cartographies permettent d'identifier visuellement des structures, ou pans de structure, de concepts et techniques qui

permettent à leur tour de structurer le développement des produits multidisciplinaires. Pour déterminer les structures à privilégier, nous avons introduit les notions de consensus et de densité, qui doivent toutefois être considérés avec précaution. Nos cartographies permettent ainsi de guider les industriels dans leur recherche de concepts et techniques. Par ailleurs, les liens illustrent la manière dont les entreprises peuvent opérationnaliser cette structure, notamment en soulignant les complémentarités.

Ce travail de cartographie permet aussi aux chercheurs d'identifier de nouveaux axes potentiels de recherche. Par exemple, il apparaît que peu de travaux traitent de l'opérationnalisation d'Agile, ou du LPD, comparativement à l'ensemble IS. De plus, cette vue globale permet aux chercheurs de positionner leur contribution dans une perspective plus large, pour en favoriser l'adoption. C'est notamment en ce sens que la perspective d'une base collaborative a été énoncée précédemment. Globalement, les travaux du volet « littérature scientifique », présentés au chapitre 5, nous ont permis d'atteindre notre **objectif de cartographie de la littérature scientifique**.

Le volet « pratiques industrielles », présenté au chapitre 6, apporte une dimension plus pragmatique à nos travaux. Ce volet, à travers des entrevues menées au sein de 10 entreprises issues de différents secteurs industriels, a permis d'en décrire deux aspects. Premièrement, nous avons identifié puis cartographié les concepts et techniques employés par les entreprises afin d'appuyer le développement de leurs produits multidisciplinaires. Deuxièmement, notre analyse a permis de décrire par le biais de facteurs et de critères comment les entreprises ont sélectionné ou adapté leurs pratiques de développement. Ces deux aspects apportent une réponse à notre **objectif spécifique d'analyse des pratiques industrielles**. À travers cette étude, nous avons constaté que l'industrie semble prendre le pas de l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire, et que les entreprises de notre échantillon modifient à différents niveaux leurs pratiques de développement. En termes de contribution académique, ce second volet apporte alors de nouvelles connaissances sur les concepts et techniques mis en œuvre par les entreprises, de même que sur l'évolution de leurs pratiques de développement.

Sur la base des volets « littérature scientifique » et « pratiques industrielles », il a été possible **d'identifier les écarts et les similarités entre les propositions de la littérature scientifique et les pratiques industrielles liées au développement de produits multidisciplinaires**. Parmi les écarts identifiés, nous retenons un manque de variété parmi les concepts et techniques employés, et un possible manque de structuration au sein des entreprises, qui s'invitent comme deux opportunités pour améliorer le développement de produits. Ces deux manques, également constatés par d'autres chercheurs, ont mené à l'énumération de lignes directrices pour constituer une démarche d'accompagnement. Notre **objectif spécifique de comparaison entre littérature scientifique et pratiques industrielles** a donc pu être atteint à travers les résultats discutés au chapitre 7. En termes de contribution académique, les manques actuels relevés permettent d'identifier de futurs axes de recherche sur l'usage, ou l'absence d'usage, de certains concepts et techniques. En termes de contribution industrielle, la comparaison, à travers les manques identifiés, peut amener les entreprises à se questionner sur leurs pratiques de développement. Cela permet de faire un premier pas vers l'application de la démarche d'accompagnement discutée ci-après.

La démarche d'accompagnement doit **permettre aux entreprises d'identifier et de structurer un ensemble cohérent de concepts et techniques afin de soutenir l'évolution de leurs produits vers des produits multidisciplinaires**. Nos apports se focalisent principalement sur trois aspects : la cartographie des concepts et techniques utilisés par l'entreprise, grâce à l'usage du modèle APMO ; la mise à contribution de nos cartographies de la littérature scientifique œuvrant comme une base de concepts et techniques dédiés au développement de produits multidisciplinaires ; et la génération d'une nouvelle structure de concepts et techniques pour l'entreprise considérée. La démarche s'appuie sur une association entre des défis et les concepts et techniques menant à une structure de développement en phase avec le produit multidisciplinaire à développer et le contexte de l'entreprise. Enfin, notre démarche d'accompagnement a pu être appliquée sur un cas industriel pour le développement d'une nouvelle génération d'équipement agricole. Ce cas d'application illustre la mise en

œuvre de la démarche proposée, contribuant à valider notre démarche dans un contexte industriel. En conséquence, l'**objectif principal** peut être considéré comme atteint.

D'une manière générale, nos travaux se démarquent en offrant une vue globale sur la variété de concepts et techniques du développement de produits multidisciplinaires. L'analyse menée sur quatre niveaux et les structures de développement identifiées sont des éléments différenciateurs qui nous permettent de présenter des contributions tant pour l'industrie que pour la recherche scientifique.

ANNEXE I

AUTRES TERMINOLOGIES DE PRODUITS MULTIDISCIPLINAIRES

D'autres terminologies peuvent être rencontrées dans la littérature scientifique en plus de produits intelligents, mécatronique, ou encore SCP discutés au chapitre 2. On pourra citer l'adaptronique (Nattermann et Anderl, 2013), ou encore la plastronique (Cheval, 2015). La plastronique est définie comme « un domaine dans lequel les dispositifs associent composants électroniques et pièces plastiques dans le but de leur apporter de « l'intelligence » et donc d'intégrer des fonctions mécaniques, fluidiques, optiques, thermiques... » (Cheval, 2015). Ce type de produit s'apparente, selon notre compréhension, à de l'électromécatronique, où la mécanique repose majoritairement sur le domaine de la plasturgie. Bien que Nattermann et Anderl aient proposé une vision où l'adaptronique est une évolution de la mécatronique (Nattermann et Anderl, 2013), ce terme allemand créé par le *VDI Technology Centre* se réfère initialement aux matériaux et structures intelligents (Janocha, 2007 ; Breitbach, Anhalt et Monner, 2001). En ce sens, ils ne font pas partie du périmètre de notre étude.

En lien avec la miniaturisation des composants, deux terminologies viennent décrire les systèmes électromécaniques aux échelles micro et nanométriques, respectivement les MEMS et les NEMS tel que représenté par la Figure-A I-1 (Lyshevski, 2004). Les *micro-electromechanical systems* (MEMS) relèvent d'un concept apparu en 1987 (Ko, 2007) et sont définis comme étant des systèmes intégrés incluant de la microélectronique (IC), des micros actionneurs et, dans une majorité de cas, des micros capteurs (Bao et Wang, 1996). Les NEMS sont similaires, mais à une échelle nanométrique. Cela traduit la tendance de miniaturisation actuelle des composants des produits. Certains auteurs perçoivent les MEMS comme faisant partie de la mécatronique (Tomizuka, 2002), là où d'autres perçoivent les MEMS comme une technologie permettant le développement de capteurs et actionneurs pour les applications mécatroniques (Bishop, 2002). Cette technologie étant de plus en plus souvent intégrée au sein des capteurs, actionneurs et dispositifs de communication – notamment sans fil (Bishop, 2002).

De notre point de vue, ce type de produit peut être intégré au sein de produits mécatroniques, de produits intelligents (Crepaldi *et al.*, 2014) ou encore de SCP sous forme de composants, mais leur développement, spécifique compte tenu de leur échelle, ne sera pas abordé en tant que tel.

Enfin, la robotique et cobotique sont également en lien avec le développement multidisciplinaire de par les disciplines sollicitées pour leur développement. La cobotique, inventée en 1996, est née de l'association des mots « collaboratif » et « robot » et est définie comme un robot conçu pour effectuer des tâches en collaboration avec des humains (Shravani et Peshkin, 2018).

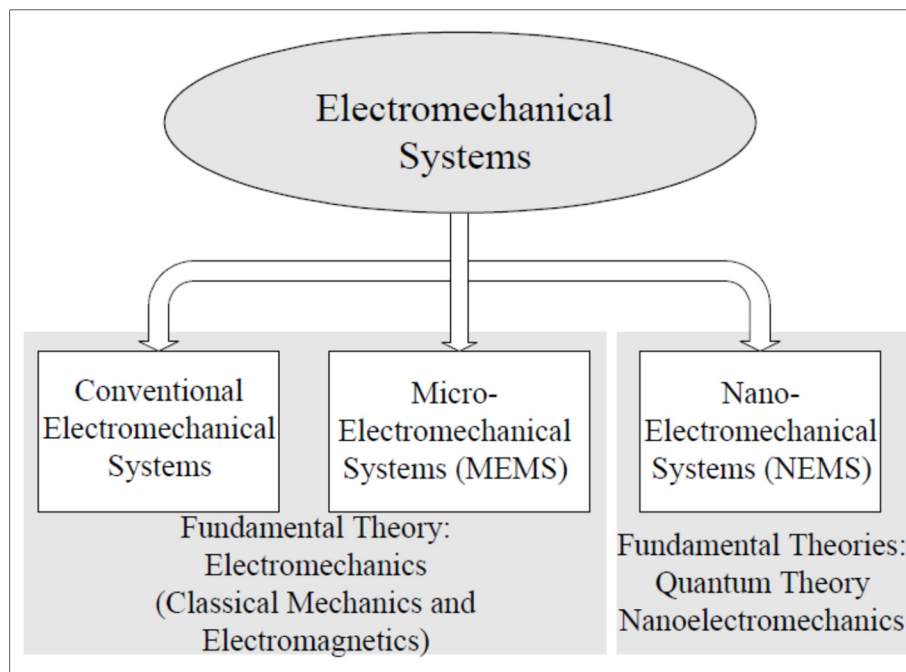


Figure-A I-1 Positionnement relatif des MEMS et NEMS
par rapport aux systèmes électromécaniques
Tirée de Lyshevski (2004)

Bien que la robotique puisse être perçue comme une sous-catégorie de la mécatronique (Fumio Harashima, Tomizuka et Fukuda, 1996 ; Bishop, 2002 ; Schramm, Lalo et Unterreiner, 2010)

de par l'implication de disciplines similaires; la robotique est une communauté scientifique et un champ d'expertise à part. En ce sens, la robotique et la cobotique ne seront pas traitées en tant que telles dans ces travaux. Une transposition de nos travaux reste cependant envisageable.

ANNEXE II

REQUÊTES EFFECTUÉES DANS LES BASES DE DONNÉES

Bases de données	Requêtes
Scopus	<p>TITLE (("Mechatronic* product*" OR "Mechatronic* system*") AND ("development" OR "design")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))</p> <p>TITLE (("Cyber physical system*" OR "Cyber-physical system*") AND ("development" OR "design")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</p> <p>TITLE (("Smart product*" OR "Smart system*") AND ("development" OR "design")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))</p>
Web of Science	<p>TITLE: (("Mechatronic* product*" OR "Mechatronic* system*") AND ("development" OR "design")) Refined by: DOCUMENT TYPES: (ARTICLE) AND LANGUAGES: (ENGLISH) Timespan: All years. Databases: WOS, CCC, DIIDW, KJD, MEDLINE, RSCI, SCIELO</p> <p>TITLE: (("Smart product*" OR "Smart system*") AND ("development" OR "design")) Refined by: LANGUAGES: (ENGLISH) AND DOCUMENT TYPES: (ARTICLE) Timespan: All years. Databases: WOS, CCC, DIIDW, KJD, MEDLINE, RSCI, SCIELO.</p> <p>TITLE: (("Cyber physical system*" OR "Cyber-physical system*") AND ("development" OR "design")) Refined by: LANGUAGES: (ENGLISH) AND DOCUMENT TYPES: (ARTICLE) Timespan: All years. Databases: WOS, CCC, DIIDW, KJD, MEDLINE, RSCI, SCIELO.</p>

ANNEXE III

LE DÉVELOPPEMENT MÉCATRONIQUE

Cette annexe vise à présenter les concepts et techniques qui sont discutés au sein de du corpus de la littérature scientifique retenu pour soutenir le développement de produits mécatroniques. Ces différents concepts et techniques, détaillés au cours des prochaines sections, ainsi que les liens relevés entre eux ont permis de constituer la cartographie correspondante représentée par les Figure 5.3 à Figure 5.7. Cette annexe vient donc compléter les éléments présentés au CHAPITRE 5.

Les sections III-1 et III-2 traitent respectivement de l'ingénierie système et du cycle en V, ainsi que des concepts et techniques qui s'y rapportent. Les sections III-3 et III-4 présentent des travaux relatifs aux techniques basées sur des modèles et de modélisation. La section III-5 traite de la conception modulaire parmi d'autres techniques telles que la matrice de structure de conception – *design structure matrix* (DSM) –, et le déploiement de la fonction qualité – *quality function deployment* (QFD). Les sections III-6, III-7, III-8 et III-9 se concentrent sur quatre approches différentes et sur les concepts et techniques qui leur sont liés ; respectivement Agile, Systématique, Axiomatique et Éco-conception. La section III-10 présente le développement intégré de produits, et la section III-11 aborde divers concepts et techniques n'étant pas rattachés aux sections précédentes.

À la fin de chaque section, il est fait mention des figures qui contiennent les concepts et les techniques abordés. Par conséquent, pour retrouver sur la cartographie un concept ou une technique et sa référence à partir de l'énumération textuelle, il faut d'abord rechercher les figures mentionnées, puis le concept ou la technique. La référence est positionnée proche du bloc ou le long des liens connectés au bloc.

III-1 Ingénierie système et concepts et techniques apparentés

Avant tout, il convient de définir ce qu'est l'ingénierie système (IS). Pour cela nous nous appuyons en partie sur une définition proposée par l'*International Council on Systems Engineering*²⁵ (INCOSE) en 2004 et énoncée dans leur vadémécum (INCOSE, 2015). À noter que la branche française de l'INCOSE est l'Association Française d'Ingénierie Système (AFIS)²⁶.

Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. It focuses on defining customer needs and required functionality early in the development cycle, documenting requirements, and then proceeding with design synthesis and system validation while considering the complete problem: operations, cost and schedule, performance, training and support, test, manufacturing, and disposal. Systems engineering integrates all the disciplines and specialty groups into a team effort forming a structured development process that proceeds from concept to production to operation. Systems engineering considers both the business and the technical needs of all customers with the goal of providing a quality product that meets the user needs.

L'IS se définit alors par une « approche interdisciplinaire » tournée vers la réalisation de systèmes. L'IS a également une portée systématique, à travers une planification établie et un produit répondant à des exigences définies en amont. Cependant, nous la distinguons de l'approche de conception systématique. La philosophie sous-jacente de l'IS se rapporte en effet à la pensée systémique. Cela se retrouve dans la définition à travers une considération holistique du problème au long de toutes les étapes du cycle de vie du système. La définition proposée par l'INCOSE suggère néanmoins l'ébauche d'un processus.

²⁵ <https://www.incose.org/>

²⁶ <https://www.afis.fr/>

Des normes ont également permis de documenter l'IS tel que la norme Mil-Std-499 en 1969 puis, plus récemment, les normes IEEE 1220, l'ANSI/EIA 632 ou encore l'ISO/IEC/IEEE 15288 (International Council on Systems Engineering, 2007 ; Electronic Industries Alliance - EIA, 1999 ; ISO/IEC/IEEE, 2015). Certaines de ces normes discutent des « processus » de l'IS. Par exemple, l'ISO/IEC/IEEE 15288 présente trente « processus » de l'IS répartis entre les processus techniques, de gestion de projets, organisationnels et d'entente. Cependant, dans l'EIA632, on retrouve cette notion de principes allant dans le sens de l'approche. Ces principes sont exprimés à travers 33 « requirement » énoncés dans une formulation de type « the developer shall ». Bien que certains concernent la gestion de projet, d'autres concernent le développement de produits. Ainsi, dans ce cadre de nos travaux, l'IS est considérée comme une approche.

L'ingénierie système (IS) est une approche mentionnée par plusieurs auteurs pour soutenir le développement de produits mécatroniques et est généralement associée au cycle en V (Dieterle, 2005 ; Kleiner et Kramer, 2013 ; Mcharek *et al.*, 2019 ; Mhenni *et al.*, 2014 ; R.Rothful *et al.*, 2006 ; Sünnetcioglu *et al.*, 2016 ; Zheng *et al.*, 2017 ; Turki, Soriano et Sghaier, 2005). Cette association entre l'IS et le « Vee process model » a été proposée par (Forsberg et Mooz, 1991). Cependant, Forsberg et Mooz ne traitent pas du développement de produits mécatroniques. Différents auteurs complètent cette association avec d'autres concepts et techniques.

Par exemple, Mcharek *et al.* introduisent des préoccupations de gestion des connaissances afin de faciliter la collaboration tout au long du processus de développement de produits, dans ce cas-ci, un cycle en V. Ceci est mis en œuvre par le biais de la plateforme KARREN²⁷ (Mcharek *et al.*, 2019 ; Mcharek *et al.*, 2018). De notre point de vue, l'ingénierie basée sur la connaissance – *knowledge-based engineering* (KBE) – est considérée ici comme une méthode, car la réutilisation des connaissances peut être considérée comme une pratique d'ingénierie. Cette question de la connaissance est également abordée par Delbecq *et al.* (2017) qui envisagent,

²⁷ <https://www.dps-karren.com/>

à travers la modélisation, la possibilité de construire des bibliothèques de modèles de composants et de systèmes qui peuvent être stockés et réutilisés. Le cadre proposé par Delbecq *et al.* soutient la conception basée sur les modèles – *model-based design* – et intègre à la fois la modélisation acausale et causale. En outre, les auteurs ont mentionné que la modélisation soutient les processus d'IS.

D'autres auteurs complètent l'association IS et cycle en V par des techniques de modélisation telles que la modélisation fonction-comportement-état – *Function-Behavior-State modelling* (Habib et Komoto, 2014 ; Komoto et Tomiyama, 2010 ; Komoto et Tomiyama, 2012), la conception basée sur les modèles (Dieterle, 2005 ; Kleiner et Kramer, 2013), la modélisation et la simulation de systèmes (Rothful *et al.*, 2006). Au sein du couple IS et cycle en V, Mhenni *et al.* (2014) s'intéressent à l'étape de « System design ». Les auteurs proposent une « méthodologie » sur la base du SysML pour la modélisation système et explicitent notamment l'utilisation des différents diagrammes. Au-delà de la modélisation, leur « méthodologie » s'appuie sur deux analyses que sont l'analyse en boîte noire et en boîte blanche – *black-box and white box analysis* – voir Figure 5.7. Ces analyses sont considérées comme des procédures, leur « méthodologie » se rapporte ainsi à une méthode composée de ces deux analyses. Cette méthode est complétée par le recours à la décomposition et l'analyse fonctionnelle qui peuvent être réalisés par l'APplication aux Techniques d'Entreprise (APTE), le diagramme FAST (Function analysis system technique) ou encore le SADT (Structured Analysis and Design Technics), illustrés sur la Figure 5.4. Selon notre compréhension, la modélisation système est utilisée pour soutenir la décomposition et l'analyse fonctionnelle. Les auteurs cherchent ainsi à créer un lien entre les niveaux approche et processus et le niveau outil représenté par l'usage de la modélisation système basée sur le SysML par l'introduction de l'analyse en boîte noire et boîte blanche, ainsi que par la décomposition et l'analyse fonctionnelle réalisées en APTE-FAST-SADT.

Couturier *et al.* (2014) positionnent leurs travaux dans le cadre d'une approche IS et du cycle en V, complété par l'ingénierie systèmes basée sur les modèles – *model-based systems*

engineering (MBSE). Le cycle en V est envisagé comme itératif et plusieurs itérations sont nécessaires pour l'obtention d'un produit mature. Les auteurs discutent également de l'utilisation de la conception axiomatique, de la modélisation fonction-comportement-état – *Function-Behavior-State* – ainsi que de la fonction-comportement-structure – *Function-Behavior-Structure* – à des fins de raisonnement, de synthèse, d'analyse et d'évaluation (Couturier *et al.*, 2014). La modélisation fonction-comportement-état a été initialement définie par Umeda *et al.* (1996) et est à distinguer du modèle fonction-comportement-structure de Gero et Kannengiesser (2004).

Dans le cadre d'une approche IS, Zheng *et al.* (2017) discutent également de l'adaptation d'un cycle en V, comme processus de conception au niveau macro, associé à un modèle de conception hiérarchique – *hierarchical design model* – au niveau micro (Zheng *et al.*, 2017). Selon nous, le modèle de conception hiérarchique réalise une structure hiérarchique qui vise à soutenir chaque étape du côté descendant du cycle en V, soit « requirements specification », « functional model » et « architectural model » (Zheng *et al.*, 2017). La réalisation de cette structuration hiérarchique peut ainsi être assimilée à une pratique d'ingénierie, classant la conception hiérarchique comme une méthode. Par ailleurs, la technique de modélisation d'interfaces multidisciplinaires, intégrant un modèle d'interface, est introduite pour assurer la cohérence entre les niveaux macro et micro du « processus » de développement. En fonction de son utilisation, cette technique de modélisation d'interfaces – *interface modelling technique* – peut être envisagée comme une méthode ou un outil. En effet, la technique sera classée comme un outil si l'assurance de la cohérence entre les niveaux macro et micro est considérée comme une tâche délimitée. En revanche, si elle est considérée comme une pratique d'ingénierie soutenue par la classification des interfaces – *interface classification* – et la vérification de la compatibilité des interfaces – *interface compatibility check* –, la technique de modélisation d'interfaces sera positionnée comme une méthode (Zheng *et al.*, 2016 ; Zheng *et al.*, 2019). Les deux visions sont plausibles, mais la seconde est adoptée en raison du positionnement relatif avec les outils. En lien avec l'exploitation du modèle d'interface intégré à la technique de modélisation d'interfaces, Zheng *et al.* (2019) proposent également

l'utilisation d'une « interface model-based configuration design method » pour la conception de configurations basée sur la modularisation et l'emploi de la vérification de la compatibilité des interfaces pour assurer la compatibilité entre les modules conçus. Ces auteurs introduisent ainsi un lien avec la conception modulaire à travers cette notion de modularité.

Les concepts et techniques abordés dans cette section sont représentés sur les Figure 5.3, Figure 5.5 et Figure 5.7. Les concepts et techniques se rapportant à l'IS sont identifiés par un rectangle bleu clair.

III-2 Cycle en V et concepts et techniques apparentés

Le cycle en V – dénommé *V-model* en anglais – est un processus reconnu pour le développement de produits mécatroniques. Celui du VDI2206:2004 est couramment cité (Malmquist, Frede et Wikander, 2014) et adapte le cycle V au développement de systèmes mécatroniques en combinant l'ingénierie mécanique et électronique avec les technologies de l'information, le tout soutenu par la modélisation et l'analyse de modèles tel que représenté sur la Figure-A III-1 (VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik, 2004). À noter qu'une nouvelle version du VDI2206 est en cours de développement et est axée sur le « Development of cyber-physical mechatronic systems » (Graessler et Hentze, 2020). Une première ébauche est disponible depuis septembre 2020 sur le site de la VDI²⁸.

Malmquist *et al.* discutent du cycle en V issu du VDI2206 et de sa forme itérative. Les auteurs proposent également une « méthodologie de conception holistique » qui favorise le développement simultané de la mécanique, de l'électrique et du contrôle. Cette « méthodologie » s'appuie sur la construction de modèles à partir de bibliothèques de composants (Malmquist, Frede et Wikander, 2014). Selon notre compréhension, les auteurs

²⁸<https://www.vdi.de/en/home/vdi-standards/details/homevdivde-2206-development-of-cyber-physical-mechatronic-systems-cpms>

utilisent une conception basée sur les modèles appuyée par une modélisation orientée composants – *components-oriented modelling*.

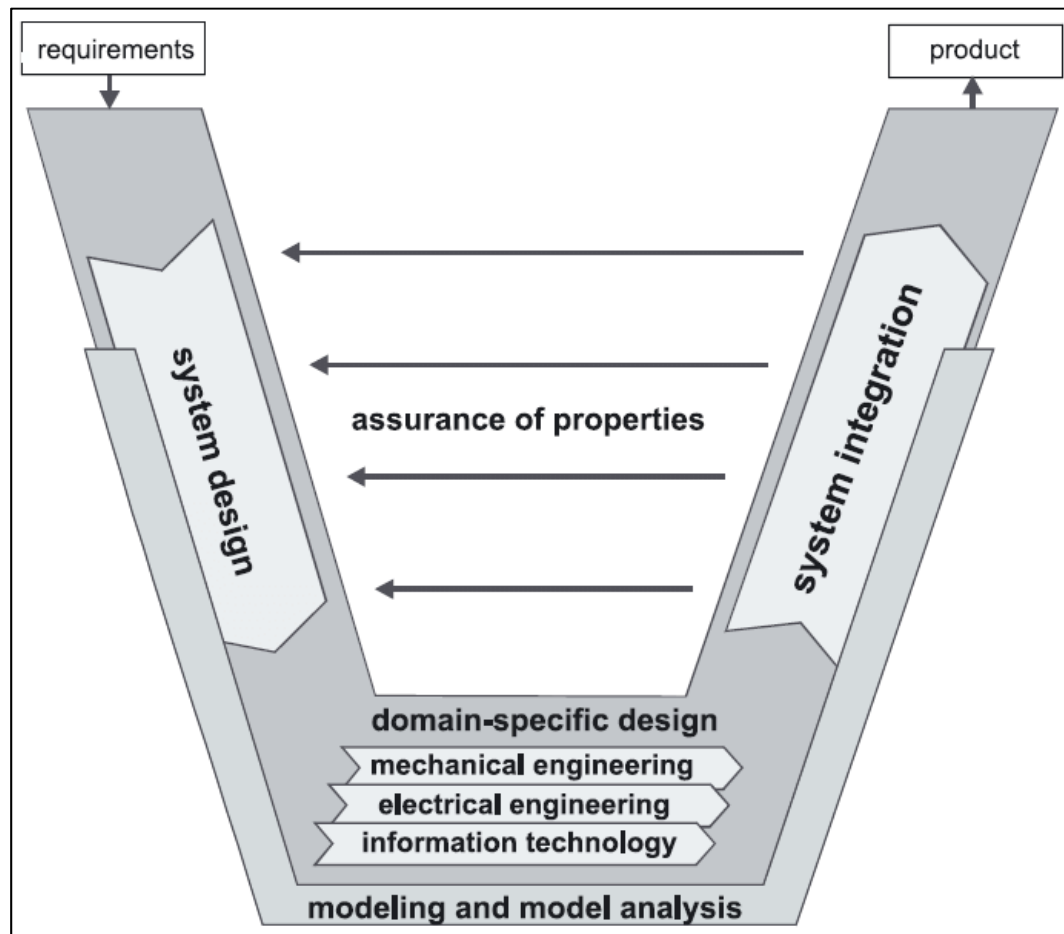


Figure-A III-1 Illustration du cycle en V issu du VDI2206
Tirée de VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (2004)

Sur la base du cycle en V du VDI2206:2004, Oestersötebier *et al.* (2012) proposent un processus de conception pour les « systèmes mécatroniques intelligents ». Toutefois, Oestersötebier *et al.* (2012) se distinguent des solutions précédentes par l'utilisation du Web sémantique et des ontologies qui sont envisagées comme un moyen de stocker les connaissances. Cette base de connaissances permet de stocker des « solution patterns » associés à des « solution elements » en vue d'être réutilisés dans le cadre de projets ultérieurs.

Cela permet de réduire l'effort de modélisation, de soutenir la conception basée sur les modèles et, par conséquent, le processus de « conception de systèmes mécatroniques intelligents » (Oestersötebier *et al.*, 2012). La modélisation est réalisée par une modélisation orientée objet en Modelica²⁹ (Oestersötebier *et al.*, 2012). En lien avec les pratiques de réutilisation, Bachmann et Messnarz suggèrent d'utiliser le cycle en V et de promouvoir la réutilisation des modules logiciels et systèmes pour mettre en œuvre une stratégie de plateforme (Bachmann et Messnarz, 2012). Pour une lecture complémentaire sur l'ingénierie orientée réutilisation et plus précisément l'ingénierie logicielle orientée réutilisation – *reuse-oriented software engineering* –, il est possible de consulter (Sommerville, 2010).

Le cycle en V peut également être soutenu par la modélisation système (Valasek, 2016 ; Vasić et Lazarević, 2008). Valasek discute de la conception à travers la modélisation, « design through modelling », et offre une vue synthétique de différentes techniques de modélisation, incluant les équations, les blocs, les multipôles et les graphes de liaisons – *bond graphs* (Valasek, 2016).

Différents auteurs utilisent également le cycle en V pour positionner leur contribution. Par exemple, Habchi et Barthod proposent une « méthodologie en dix étapes » organisant la partie descendante du cycle en V. Cette « méthodologie » agrège également différentes méthodes et outils sur chacune des dix étapes. Certaines méthodes et certains outils utilisés sont issus de l'ingénierie mécanique avec l'utilisation d'APTE appuyé par le diagramme pieuvre et la bête à cornes, ainsi que le diagramme FAST et le diagramme de blocs de fonctions – *functional block diagram* – pour soutenir la décomposition et l'analyse fonctionnelle. Pour l'architecture, les auteurs utilisent des diagrammes de blocs. Pour le comportement du système, les auteurs emploient des réseaux de Petri, et l'Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) – « FMEA » pour *Failure mode and effect analysis* dans la cartographie – pour l'analyse des dysfonctionnements (Habchi et Barthod, 2016). Hehenberger positionne également sa

²⁹ <https://www.modelica.org/>

contribution dans le cadre du cycle en V (Hehenberger, 2015). L'auteur explore la conception paramétrique basée sur les modèles – *model-based parametric design* – et discute des modèles hiérarchiques. Plateaux *et al.* se concentrent également sur la partie descendante du cycle en V. Pour la décomposition et l'analyse fonctionnelle, les auteurs emploient SADT et s'appuient sur du SysML (Plateaux *et al.*, 2010). Également dans le but de conduire et d'appuyer la décomposition et l'analyse fonctionnelle, Derelöv *et al.* (2008) proposent de s'appuyer sur une extension du modèle de Hubka-Eder issu de la théorie des systèmes techniques (Hubka et Eder, 1988). Cette extension du modèle de Hubka-Eder permet ainsi de réaliser une modélisation fonctionnelle.

Alvarez Cabrera *et al.* positionnent également leurs travaux dans le cadre du cycle en V et proposent un modèle architectural – *Architectural model* – pour « soutenir les activités d'architecture des systèmes ». D'après notre lecture, le modèle architectural est lié aux pratiques basées sur les modèles. Dans la cartographie, ce bloc regroupe le *model-based* et *model-driven design, development, engineering* et *architecture*. Leur modèle architectural repose sur quatre couches que sont « fonction », « structure », « behavior » et « external communications » (Alvarez Cabrera, Woestenenk et Tomiyama, 2011). Ce modèle architectural est également discuté par (Hehenberger, 2014) et est, d'après notre compréhension, lié à la technique de modélisation hiérarchique – *hierarchical modelling technique*. Le modèle architectural peut être positionné au niveau méthode, car il soutient l'architecture et la décomposition du système selon une procédure technique – les couches – et vise à créer et à utiliser une représentation du produit.

Enfin, Barbieri *et al.* suggèrent l'utilisation du cycle en W proposé par (Nattermann et Anderl, 2010). Représenté par la Figure-A III-2, le cycle en W a été initialement proposé pour les systèmes adaptroniques, et est dérivé du cycle en V du VDI 2206. Bien que l'adaptronique soit présentée par Nattermann et Anderl comme proche de la mécatronique et impliquant des disciplines similaires, la référence est considérée comme ajoutée pour améliorer la compréhension globale sur la cartographie. En complément du cycle en W, les auteurs

mentionnent également l'utilisation de la conception basée sur les modèles soutenue par la modélisation système effectuée en SysML, ainsi que l'AMDE. L'AMDE peut ainsi être employée pour mener une stratégie de gestion des défaillances qui s'appuie sur la décomposition et l'analyse fonctionnelle (Barbieri, Fantuzzi et Borsari, 2014).

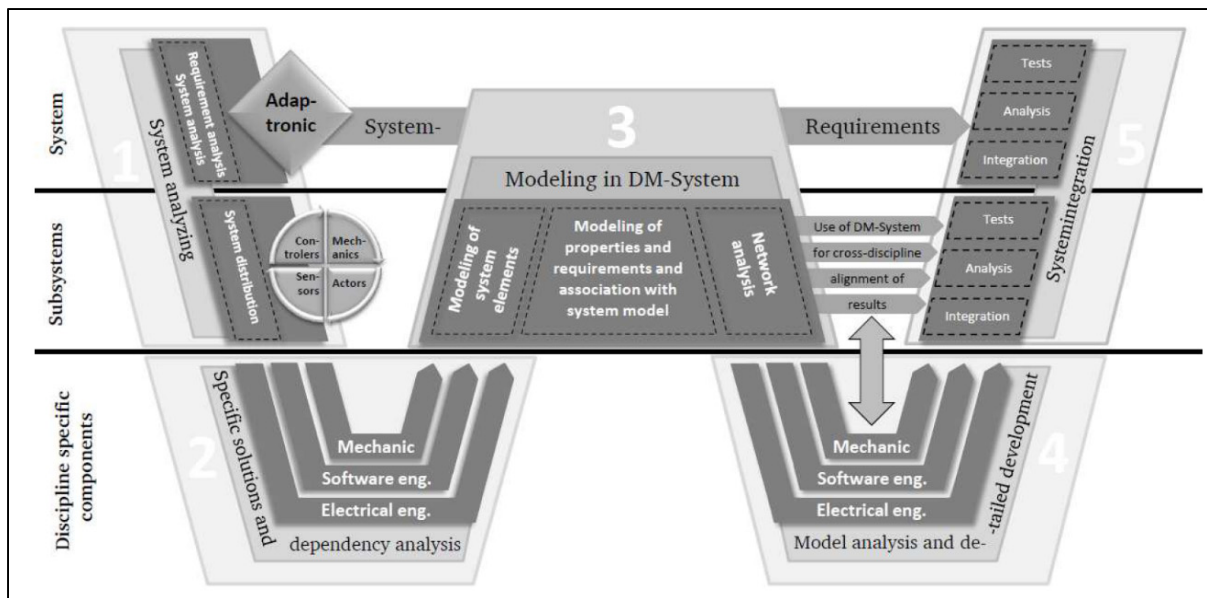


Figure-A III-2 Illustration du cycle en W
Tirée de Nattermann et Anderl (2010)

Ces différents concepts et techniques sont représentés sur les Figure 5.3, Figure 5.5 et Figure 5.7.

III-3 Techniques de modélisation système et basées sur les modèles

Les techniques de modélisation système sont discutées par de nombreux auteurs pour le développement de produits mécatroniques – bloc *system modelling techniques*. Cette pratique était déjà discutée en 1989 par Buur et Andreasen qui considéraient la modélisation comme un moyen « d'acheter » de l'information au cours des premières phases de la conception, de manière à faire face à la complexité et réduire le risque de mauvaises décisions (Buur et

Andreasen, 1989). Ces auteurs ont souligné la nécessité d'un « a model language or a model type that could improve communication both between mechanical, electrical and software engineers, and between the project team and, for example, managers and users », plaçant ainsi les modèles au cœur de la collaboration. Sur la base d'observations similaires, Fruchter *et al.* (1996) proposent un *model-centered collaborative system design*, avec l'utilisation de modèles de forme, comportementaux et fonctionnels. En lien avec la modélisation, Rui-Qin et Hui-Jun (2005) proposent leur propre symbolique pour modéliser les systèmes mécatroniques. Cet intérêt pour les modèles peut s'expliquer par les possibilités offertes. Par exemple, les modèles permettent de simuler et d'analyser le comportement d'un système plus tôt dans le processus de conception (Schmüdderrich *et al.*, 2013). Cela permet de détecter les erreurs plus tôt, de les corriger plus facilement et à moindre coût. En ce sens, certains auteurs combinent la conception basée sur les modèles avec la mise en service virtuelle – *virtual commissioning* (Ahrens *et al.*, 2018 ; Schmüdderrich *et al.*, 2013). En effet, cette mise en service virtuelle permet la création d'une copie du système réel afin d'effectuer des tests anticipés (Ahrens *et al.*, 2018). À noter que Schmüdderrich *et al.* (2013) font également usage de la conception modulaire.

La modélisation est également liée à la mise en œuvre de l'ingénierie système basée sur les modèles – *model-based systems engineering* (MBSE) –, qui peut être combinée avec la matrice de structure de conception – *design structure matrix* (DSM) – pour « soutenir l'élaboration de l'architecture du système » (Bricogne, Le Duigou et Eynard, 2016). La combinaison du MBSE avec la modélisation système effectuée en SysML est discutée par différents auteurs (Bricogne, Le Duigou et Eynard, 2016 ; Cao, Liu et Paredis, 2011 ; Chami et Bruel, 2015 ; Fan *et al.*, 2016 ; Yuan *et al.*, 2016). Cao, Liu et Paredis (2011) affirment par ailleurs que le « MBSE is the mainstream method for complex system design » ainsi que le fait que le « MBSE facilitates dependency tracing between different models and the reuse of knowledge ». Sur la base du MBSE, certains auteurs se concentrent sur la vérification des modèles, comme les travaux proposés par Chen *et al.* (2019) dans lesquels la conception des systèmes est effectuée en SysML.

Parallèlement aux pratiques du MBSE, on retrouve des pratiques « basées sur les modèles », et « guidées par les modèles », combinées avec les terminologies « ingénierie », « développement », « architecture » et « conception ». Pour plus d'informations sur les différences entre les pratiques basées sur les modèles et celles dirigées par les modèles, Kernschmidt, Feldmann et Vogel-Heuser (2018) expliquent leurs différences. Les auteurs proposent également un *framework* pour le développement mécatronique positionné dans un cycle en V et s'appuyant sur l'ingénierie basée sur les modèles, à travers une modélisation réalisée en SysML. De plus, ces auteurs défendent l'usage des bibliothèques de composants associés à leurs propriétés, d'éléments réutilisables propres à l'entreprise, mais aussi de modules afin d'accélérer le développement par la réutilisation. Les propriétés sont également employées pour comparer les solutions alternatives (Kernschmidt, Feldmann et Vogel-Heuser, 2018). Toutefois, aucun concept ou technique lié à la réutilisation n'est expressément mentionné. Cependant, selon notre compréhension, cela est l'intention des auteurs. Cette réutilisation a vocation à soutenir la modélisation et peut être liée à l'ingénierie basée sur les modèles. Dans la cartographie, nous avons ainsi lié le *knowledge-based engineering* à l'ingénierie basée sur les modèles.

Burmester, Giese et Tichy (2005) positionnent leurs travaux dans le cadre d'un paradigme d'architecture dirigée par les modèles et suggèrent d'utiliser le développement dirigé par les modèles complété par des diagrammes d'état et des diagrammes de blocs. En lien avec la modélisation et le développement basé sur les modèles, Sadlauer et Hehenberger (2017) se concentrent sur l'utilisation de ce qui a été nommé « general-purpose modelling languages » et « model-based description languages » pour soutenir les premières phases de conception du processus VDI2221. En perspective, les auteurs discutent de l'utilisation de la DSM et de la modélisation basée sur les agents.

Alvarez Cabrera *et al.* (2010) discutent d'une variété de concepts et de techniques. Cependant, dans le *framework* développé, les auteurs ne mentionnent explicitement que l'utilisation d'une extension de la modélisation fonction-comportement-état, de techniques orientées objet,

orientées composants et orientées processus, ainsi que de l'ingénierie à base de connaissances. Au sein de la base de connaissances, la modélisation orientée composants et processus sont utilisés. Cependant, la manière dont les concepts et les techniques mentionnés sont liés les uns aux autres nécessiterait des explications supplémentaires.

Pour la modélisation, certains auteurs s'appuient sur des réseaux de Petri (Araz et Erden, 2014 ; Behbahani et Silva, 2007). Araz et Erden proposent un cadre de travail basé sur la décomposition fonctionnelle, le formalisme « discrete event system specification » (DEVS) et les réseaux de Petri. La modélisation et la simulation du comportement du système sont réalisées avec des réseaux de Petri (Araz et Erden, 2014).

Certains auteurs associent les pratiques basées sur des modèles avec d'autres concepts et techniques de simulation et de contrôle. Isermann défend l'usage de modèles mathématiques qui permettent notamment d'éviter les ajustements par essais et erreurs (Isermann, 1996a ; Isermann, 1996b). D'après ce que nous comprenons, l'auteur associe les pratiques basées sur les modèles avec des techniques de modélisation telles que les modèles mathématiques. Isermann mentionne également l'utilisation de la simulation *Hardware-in-the-loop* (HIL) pour les parties mécaniques et électroniques (Isermann, 1996a ; Isermann, 1996b). Dans une publication de 2006, Isermann décrit l'utilisation d'un cycle en V détaillé comprenant l'utilisation de *Software-in-the-loop* (SIL), HIL, le *Rapid control prototyping* (RCP), ainsi que la modélisation orientée objet (Isermann, 2006). Avec quelques similitudes, Lennon défend l'utilisation de la conception basée les modèles pour soutenir le développement de produits mécatroniques. Le modèle au niveau système est développé à l'aide de diagrammes blocs et peut être amélioré par l'entremise du *data-driven empirical modelling* (Lennon, 2008). De plus, l'auteur suggère l'utilisation de deux types de tests que sont le RCP – appelé « rapid prototyping » dans l'article – et la simulation HIL (Lennon, 2008). Le RCP est également discuté par Chen, Chen et Cheng (2009) et Lapusan *et al.* (2010), mais son association avec la simulation HIL est formalisé par Chen, Chen et Cheng (2009). Ces derniers mettent également en œuvre la méthode de conception pour le contrôle – *Design for control* (DFC) – qui

développe simultanément la conception mécanique et la conception du contrôleur, par opposition à la méthode « conception puis de contrôle » – *design then control method* (Chen, Chen et Cheng, 2009). Le DFC est introduit et appliqué à la mécatronique par Li, Zhang et Chen (2001). Dans le contexte d'un système de contrôle distribué, Mahalik *et al.* (2006) discutent de l'utilisation de la conception basée sur les composants – *components-based design* – qui, malgré des principes communs, diffère de celle utilisée pour le développement des SCP dans la section suivante. La conception basée sur les composants se concentre principalement sur la conception du contrôle et vise à soutenir le RCP (Mahalik *et al.*, 2006). Renner *et al.* (2000) présentent un logigramme pour la conception pour les systèmes mécatroniques – *Design flow for mechatronic systems* – et se concentrent tout particulièrement sur l'élément de traitement de l'information. Le logigramme traite principalement de la modélisation et de la simulation par la simulation HIL (Renner *et al.*, 2000). Les avantages de la simulation HIL sont également abordés dans Veitl *et al.* (2000).

Les concepts et techniques liés à la modélisation se recoupent avec de nombreux autres concepts et techniques. En conséquence, ils sont représentés sur les Figure 5.3, Figure 5.4, Figure 5.5 et Figure 5.6.

III-4 Modélisation orientée objet et techniques apparentées

Dans le cadre des pratiques de modélisation, la modélisation orientée objet peut aider les ingénieurs à créer un modèle de systèmes en agréant des composants (Hamza *et al.*, 2018). Schramm, Lalo et Unterreiner (2010) se concentrent principalement sur la modélisation orientée objet pour soutenir le cycle en V. Barbieri *et al.* (2016) considèrent la modélisation orientée objet avec la modélisation orientée aspect – *aspect-oriented modelling* – comme des « outils fondamentaux » pour la conception de systèmes mécatroniques et la modélisation des comportements non fonctionnels (Barbieri *et al.*, 2016). Les auteurs discutent également de la simulation SIL et HIL. Les techniques de conception orientées objet – assimilées selon nous à de la modélisation orientée-objet – sont également utilisées par Counsell *et al.* (2002) pour

structurer les connaissances d'ingénierie. Ces objets peuvent être de classe « fonction », « moyen » ou « composant ». Ces connaissances peuvent ensuite être réutilisées au cours du développement de produits mécatroniques au cours de la phase de *conceptual design*. Les auteurs positionnent ainsi l'usage de l'ingénierie à base de connaissances au sein d'un processus systématique de type Étape-jalon – *Stage-gate* – proposé par French (1985).

Wu *et al.* (2009) utilisent également la modélisation orientée objet au sein de leur *framework* qui peut également s'intégrer dans le processus Étape-jalon en six étapes proposé par Ulrich et Eppinger (2004). Le *framework* repose sur la technique proposée de *hierarchical object-oriented (OO) functional modelling*, qui intègre des décompositions orientées objet et fonctionnelles pour soutenir les étapes de « développement de concepts » et de « conception au niveau système » du processus (Wu, Leu et Liu, 2009). Cette technique est considérée comme une méthode, car elle est décrite comme une procédure et s'inscrit comme un soutien au processus de développement. Par ailleurs, les auteurs positionnent également leur travail en lien avec l'approche de conception axiomatique – *Axiomatic design* – présentée dans la section III-7. Les auteurs introduisent un modèle fonctionnel et un modèle objet pour soutenir respectivement le domaine fonctionnel et le domaine physique de la conception axiomatique. En complément, les auteurs proposent un modèle de flux d'informations qui est utilisé pour accompagner l'association entre les deux domaines. Ces trois modèles (objet, fonctionnel, et flux d'information) sont soutenus par différentes techniques décrites ci-après. Les auteurs suggèrent ainsi de soutenir le modèle fonctionnel par un arbre fonctionnel – *function tree* – qui peut à son tour être soutenu par le remue-ménages – *brainstorming* – ou le diagramme FAST. Le modèle objet est quant à lui soutenu par le *high order object model* (HOOM), qui permet d'établir une hiérarchie d'objets. Enfin, le modèle de flux d'information permettant l'association est soutenu par le *function and object mapping model* (FOMM) (Wu, Leu et Liu, 2009). Ceci est représenté sur la Figure 5.4.

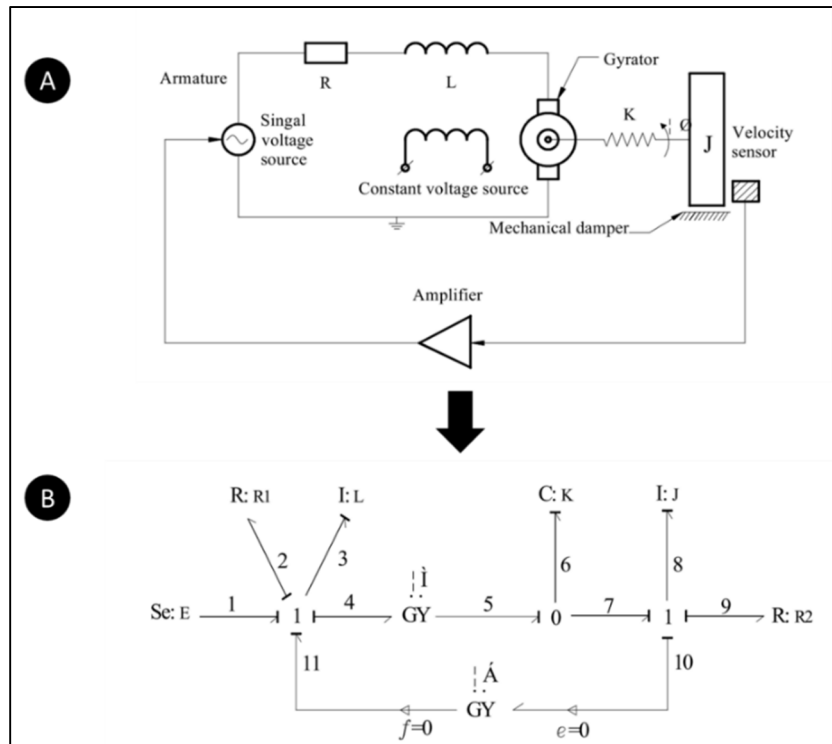


Figure-A III-3 Illustration d'un système de contrôle d'un moteur à courant continu en schéma électrique (A) et sa représentation en graphe de liaisons (B)
Tirée de Wu, He et Deng (2012)

Également lié à la modélisation orientée objet, le graphe de liaisons représente un outil possible pour la modélisation et la simulation de systèmes (Malik et Kayani, 2008 ; Mellal, Adjerid et Benazzouz, 2011). La Figure-A III-3 illustre un système de contrôle avec un moteur à courant continu sous une forme de schéma électrique (A) et son graphe de liaison associé (B) (Wu, He et Deng, 2012). Les objectifs de l'utilisation de cette représentation varient selon les auteurs. D'un côté, le graphe de liaisons est utilisé pour représenter le comportement dynamique des systèmes multidomaines, soutenir l'analyse et la simplification (Dauphin-Tanguy *et al.*, 2008 ; Mellal, Adjerid et Benazzouz, 2011 ; Wu, He et Deng, 2012). Certains auteurs combinent le graphe de liaisons avec d'autres outils et langages de modélisation tels que le diagramme de blocs, le diagramme d'activité ou d'une manière générale le SysML (Schweiger *et al.*, 1999 ; Turki, Soriano et Sghaier, 2005). De plus, Schweiger *et al.* (1999) appliquent également des

diagrammes d'état pour les composants de traitement de l'information, combinant ainsi les graphes de liaisons, les diagrammes de blocs et les diagrammes d'état pour la modélisation des systèmes mécatroniques. Turki *et al.* proposent d'intégrer les graphes de liaisons comme profil SysML en s'appuyant sur des extensions de diagrammes d'activité et de blocs.

D'autre part, certains auteurs combinent les graphes de liaison avec des algorithmes génétiques pour explorer l'espace des solutions afin d'évaluer et de sélectionner les architectures et les configurations de conception optimales, ou permettre l'automatisation de la conception (Dupuis, Fan et Goodman, 2015 ; Fan, Wang et Goodman, 2004 ; Malik et Kayani, 2008 ; Wang *et al.*, 2005). Toujours en lien avec l'exploration de l'espace des solutions, Gamage, De Silva et Campos (2011) s'appuient quant à eux sur les graphes linéaires – *linear graph* – pour modéliser les systèmes.

Ces concepts et techniques sont regroupés sur les Figure 5.3, Figure 5.4, et Figure 5.5.

III-5 Conception modulaire et concepts et techniques apparentés

En ce qui concerne la conception modulaire, la modularisation peut s'appuyer sur le modèle fonctionnel d'un système, lui-même réalisé à l'aide de la modélisation fonction-comportement-état (Van Beek, Erden et Tomiyama, 2010). Selon les auteurs, « [fonction-comportement-état] est un type particulier de modélisation fonctionnelle » et apparaît par conséquent comme un dérivé de la modélisation fonctionnelle. La modélisation fonction-comportement-état est utilisée par les auteurs pour faciliter la construction de la DSM. En complément, la *domain mapping matrix* (DMM) (Danilovic et Browning, 2007), une matrice de transformation, est utilisée pour associer les composants de la DSM avec les modules (Van Beek, Erden et Tomiyama, 2010). Bien que ne traitant pas du développement de produits mécatroniques, Lindemann, Maurer et Braun (2009) associent la DSM et la DMM avec la *multiple-domain matrix* (MDM) également utilisée par Osman, Stamenkovic et Lazarevic (2013). Ces derniers proposent un *framework* composé de différentes méthodes et outils tels que le déploiement de

la fonction qualité – *quality function deployment* (QFD) – outillée par la Maison de la qualité – *House of quality* (HoQ) –, la modélisation fonctionnelle et la MDM. La DSM est également citée et liée à la MDM (Osman, Stamenkovic et Lazarevic, 2013). Enfin, dans une perspective de conception robuste, les auteurs déploient une méthode de propagation des défaillances basée sur les fonctions, s'appuyant sur des outils tels que la matrice de dépendance fonctionnelle – *functional dependency matrix* –, l'arbre de propagation – *propagation tree* –, la probabilité totale de propagation – *total likelihood of propagation* – et, selon notre compréhension, la MDM (Osman, Stamenkovic et Lazarevic, 2013).

Enfin, Sangregorio *et al.* (2015) considèrent que l'IS pourrait ne pas convenir aux petits systèmes personnalisables et proposent donc une conception modulaire et la réutilisation de modules logiciels.

Les concepts et techniques abordés dans cette section sont représentés sur la Figure 5.5.

III-6 Développement de produits Agile et concepts et techniques apparentés

Agile, au sens où nous l'entendons, est la mise en application d'une partie ou de l'intégralité des 12 principes énumérés dans le Manifeste Agile (Beck *et al.*, 2001). Tel qu'illustré par la Figure-A III-4 issue de Abrahamsson *et al.* (2003), le Manifeste Agile a été constitué *a posteriori* de l'apparition de différentes « méthodes Agile » que sont *Scrum development process*, *Extreme Programming* (XP), *Adaptative Software Development* (ASD), *Crystal family of methodologies* et *Pragmatic Programming* (PP), créées pour accompagner le développement de produits logiciels.

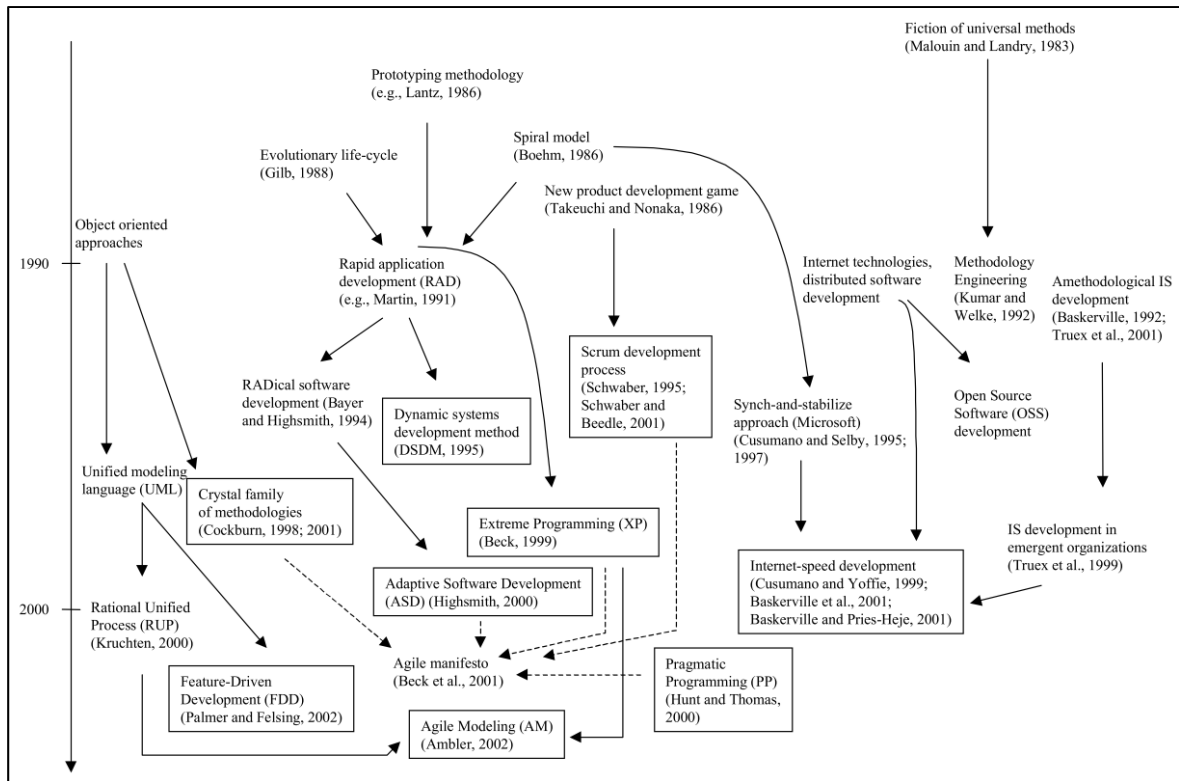


Figure-A III-4 Illustration de la constitution du Manifeste Agile sur la base des « méthodes Agiles »
Tirée de Abrahamsson *et al.* (2003)

Scrum, initialement introduit par Schwaber (1997), peut être envisagé comme un processus, car il vise à organiser logiquement le développement d'un produit (Abrahamsson *et al.*, 2003). Scrum est également une série d'étapes itératives avec des entrées (les *backlogs*) et des sorties avec la réalisation d'un incrément par l'achèvement du *sprint backlog*. La somme de chacun des incréments donnant lieu à un produit final. Ainsi, Scrum est un processus qui peut s'appuyer sur des *user stories* et des *sprints* (Goevert et Lindemann, 2018), tous deux positionnés comme des outils. Les *user stories* sont de courts scénarios permettant d'exprimer les exigences et sont également employés au sein de l'XP (Sommerville, 2010). Bien que Sommerville (2010) ne traite pas du développement de produits mécatroniques, l'XP peut s'appuyer sur des *user stories* (Sommerville, 2010). L'XP peut être considéré comme un processus ou une méthode. En effet, selon Highsmith, XP regroupe 12 pratiques qui le rapprocheraient de la méthode.

Néanmoins, Highsmith (2002) affirme également que le résultat d'XP est de livrer un « high-quality software ». De plus, il existe une représentation de XP sous forme de flux de travail tel que représenté par la Figure-A III-5 et, d'après une description faite par Sommerville (2010), XP est considéré ici comme un processus. Enfin, nous pourrions citer Abrahamsson *et al.* qui représentent XP comme couvrant une partie importante du cycle de vie du développement logiciel, de la spécification des exigences à la phase de tests du système, en passant par la conception et l'implémentation (Abrahamsson *et al.*, 2003). Ainsi, XP est considéré comme un processus au sein de notre cartographie.

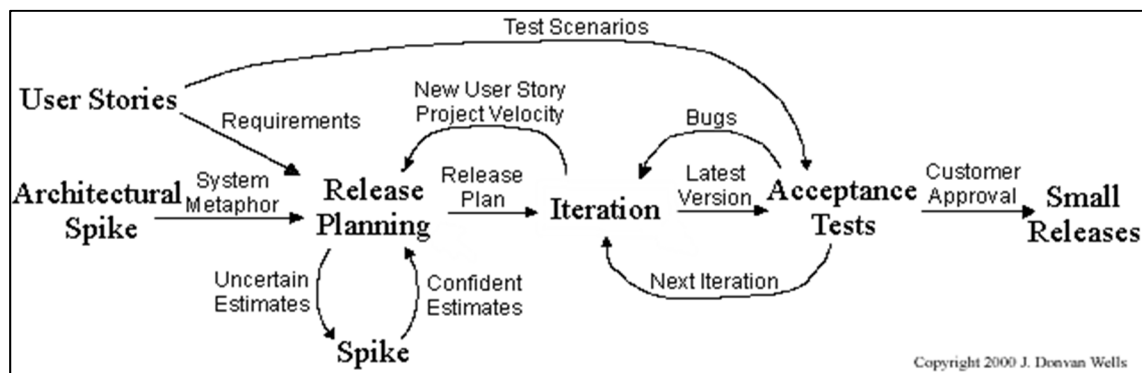


Figure-A III-5 Illustration du flux de travail de l'Extreme programming
Tirée de ExtremeProgramming.org (2000)

Le *Design thinking* est présenté par les auteurs comme une série d'étapes menant à un prototype testé, fortement axé sur le client et les itérations possibles (Goevert et Lindemann, 2018). Cette vision est également soutenue par Thoring et Müller (2011). Dans leur article, le *Design thinking* y est représenté comme un modèle de processus. Par conséquent, le *Design thinking* est considéré comme un processus dans ce cas, mais d'autres interprétations existent.

Lean Startup peut être interprété comme un processus ou une approche hybride issue d'Agile et de Lean. En conséquence, pour améliorer la cartographie, le développement de produits Lean est ajouté – *Lean product development* (Liker et Morgan, 2006). Ries affirme que le Lean Startup se situe à la croisée du « Lean manufacturing, Design thinking, customer development,

and Agile development» et qu'il s'agit d'une « new approach to creating continuous innovation » (Ries, 2011). Ries décrit également le Lean Startup comme « the application of Lean thinking to the process of innovation » et présente cinq principes. Cela ferait de Lean Startup une approche. Cependant, l'interprétation de Mueller et Thoring (2012) présente le Lean Startup comme une série d'étapes représentées par un modèle de processus circulaire. Goevert et Lindemann (2018) mentionnent également le processus en six étapes. Dans ce cas précis, les deux représentations du Lean Startup sont intégrées (Goevert et Lindemann, 2018).

Le *framework* de prototypage Agile dénommé « The Agile Framework (TAF) » a été introduit par Böhmer (2018) pour le développement mécatronique et agrège des concepts et techniques existants. Par la réalisation de prototypes, TAF vise ainsi à réduire l'incertitude et à tester des hypothèses. Le TAF est influencé par la conception centrée sur l'humain (HCD) par l'intégration de trois cycles : désirabilité, faisabilité, viabilité. Chaque cycle s'appuie sur le cycle « *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) - Deming wheel » qui introduit une considération d'amélioration continue (Goevert et Lindemann, 2018). Le TAF peut être intégré dans des modèles de processus existants, également appelés « sprints » par (Böhmer, 2018). Les « sprints » sont définis par l'auteur comme des « cycles de développement courts et limités dans le temps, avec une portée limitée ». La dénomination « sprints » est généralement utilisée pour le processus Scrum. Selon notre compréhension, le TAF peut être classé comme une méthode, car il est destiné à être incorporé dans un processus global, les « sprints » de l'auteur. Par ailleurs, du fait d'une symbolique similaire utilisée par Böhmer pour parler de Scrum et des « sprints », nous avons compris les « sprints » comme les *sprints* de Scrum, reliant ainsi TAF à Scrum dans la cartographie.

Le *Design-driven development* n'est pas suffisamment documenté au sein de littérature scientifique pour être positionné avec précision. La description fournie par Goevert et Lindemann tendrait à le positionner au niveau de la méthode, car l'accent semble être mis sur la définition des exigences. De plus, les auteurs introduisent un lien avec Scrum et XP (Goevert et Lindemann, 2018).

Disciplined Agile Delivery (DAD) est un processus selon la description fournie par Goevert et Lindemann (2018). Afin d'améliorer l'intégration de DAD, ce dernier peut être à la fois lié à Scrum et à LPD sur la base des travaux de Ebert et Paasivaara (2017).

À la croisée des travaux sur Agile et l'IS, Stelzmann aborde la question de l'agilité au sein de l'IS pour les produits intégrant des systèmes matériels et un développement logiciel important. De notre point de vue, cela peut être interprété comme de la mécatronique. L'auteur propose ce qui pourrait se traduire comme l'ingénierie agile des systèmes – *Agile Systems Engineering* (Figure 5.7) – et détermine son contexte d'application (Stelzmann, 2012). De même, Mabrouk *et al.* étudient l'hybridation des pratiques Agile avec l'approche IS, en particulier l'intégration de la « méthode » Scrum au sein de ce qui est qualifié de « MBSE design methodology » (Mabrouk *et al.*, 2018). Selon notre compréhension, par « MBSE design methodology », les auteurs utilisent la procédure d'analyse en boîte noire et en boîte blanche – *white box and black box analyses* – discutée par Mhenni *et al.* (2014), voir section III-1. Scrum est employé pour favoriser les aspects itératifs et collaboratifs, et est inséré entre l'analyse en boîte noire et celle en boîte blanche. L'analyse en boîte noire sert à constituer le *product backlog*, constituant à son tour le *backlog* du *sprint*. Le *sprint* sert à soutenir l'analyse en boîte blanche. L'analyse en boîte blanche appuyée par le *sprint* permet de générer une architecture physique (Mabrouk *et al.*, 2018). Là où l'analyse en boîte noire puis en boîte blanche amenait le développement jusqu'à une architecture physique, les auteurs ajoutent des étapes supplémentaires de prototypage et de vérification et validation, tendant alors à rapprocher cette hybridation d'un processus, car couvrant la quasi-totalité du développement de produit. Ainsi, d'après notre compréhension, les auteurs proposent un processus hybride en combinant Scrum et MBSE, s'appuyant sur *sprints* et *backlogs* (*product* et *sprint backlogs*). Ces travaux sont représentés sur la Figure 5.7.

Allant également dans le sens de l'hybridation, Plateaux *et al.* (2020) proposent le *framework* SCRUM++. Les auteurs discutent des exigences ainsi que des « concepts » sous-jacents de leur *framework*. Néanmoins, parmi les concepts et techniques discutés on retrouve les travaux

de Mabrouk *et al.* auxquels est ajouté un profil SysML permettant de sélectionner les exigences à traiter dans le prochain *sprint*. Il est également fait référence des travaux de Mhenni *et al.* à travers une formalisation dénommée MAFALDA. Les auteurs semblent également défendre une architecture modulaire au niveau fonctionnel, logique et physique. Pour ce qui a trait à la modularisation, les auteurs évoquent le recours aux ontologies pour soutenir la modularisation. Pour l'allocation de composants entre deux niveaux, les auteurs proposent de s'appuyer sur la DSM et DMM (Plateaux *et al.*, 2020), représentés sur la Figure 5.5. Au sein de la cartographie, nous avons considéré que les auteurs défendent une approche Agile, au sein de laquelle ils réemploient le processus hybride proposé par Mabrouk *et al.* appuyé par le *sprint*. Les travaux de Mabrouk *et al.* sont enrichis d'un lien entre *sprint* et *modélisation système*. Cela permet, à travers un profil SysML, de compléter la mise sur pied du prochain *sprint*. Enfin, nous avons considéré que les auteurs allaient dans le sens de la conception modulaire, soutenue par la réalisation d'ontologies. Par ailleurs, la conception modulaire est appuyée par la DSM et DMM. Ces travaux sont représentés sur la Figure 5.5 et sur la Figure 5.7.

Mule *et al.* (2020) vont dans le sens de l'hybridation entre Agile et IS pour le développement mécatronique. Ces travaux, cités par Plateaux *et al.* (2020), proposent une hybridation entre Scrum et le cycle en V (Mule *et al.*, 2020). Le cycle en V est décomposé en trois phases que sont « product architecture design », « module design » et « prototyping and testing ». Scrum est intégré aux deux premières phases. Pour la phase de « product architecture design », similairement à ce qui avait été proposé par Mabrouk *et al.*, Scrum est intégré entre l'analyse en boîte noire et celle en boîte blanche. Le soutien des *sprints* et *backlogs* est également repris. Pour la phase de « module design », Scrum est employé afin de raffiner l'architecture de la phase précédente en modules. On retrouve ainsi l'idée de modularisation et de modules fonctionnels, logiques puis physiques décrits dans Plateaux *et al.* (2020). La phase ascendante du cycle en V semble être plus conventionnelle. Les auteurs l'appuient avec du prototypage rapide, ainsi que le *model-in-the-loop*, SIL et HIL. Enfin, les auteurs discutent également du *virtual commissioning* dans leurs lignes directrices pour l'implémentation de leur proposition (Mule *et al.*, 2020). Ces travaux sont représentés sur la Figure 5.7.

Sauf mention faite, les concepts et techniques liés à Agile sont représentés sur la Figure 5.4 et sont identifiés par un rectangle rouge.

III-7 Conception systématique et concepts et techniques apparentés

L'appellation d'approche de conception dite « systématique » semble avoir été proposée par les Allemands Pahl and Beitz dans un premier ouvrage paru en 1984 (Thebault, 2013 ; Pahl *et al.*, 2007). Différents auteurs peuvent être associés à cette pensée systématique dont certains sont discutés dans (Cross, 1993) et structurant le développement en une série d'étapes ordonnées. Parmi eux, on pourra citer entre autres (Roozenburg et Eekels, 1995 ; French, 1999 ; Hubka, 1982 ; Ulrich et Eppinger, 2016 ; Ullman, 2009 ; Pugh, 1991). Pour Spitas (2011), « Systematic design is understood by most engineers to mean the well-structured progression from the abstracted level of a specification to the detailed level of the final product ». Cette approche est alors davantage déduite des modèles de processus proposés par les différents auteurs que formalisée sous la forme d'une liste de principes comme cela peut être le cas pour Agile ou Lean. Le cœur de cette approche est une structuration forte du développement de produits avec un passage par certaines étapes et livrables clés. Cette approche de conception systématique est parfois aussi dénommée « plan-driven » ou encore procédurale (Michaelis, 2013) du fait de sa forte planification et d'une comparaison par rapport à un référentiel établi lors de l'exécution (Gidel et Zonghero, 2006).

Cette approche de conception systématique est examinée, sans être nommée, par Salminen et Verho à travers l'utilisation du VDI 2221, un processus systématique de type Étape-jalon – *Stage-gate* –, et du VDI 2222, un autre modèle de processus de type étape-jalon dont la représentation graphique s'apparente à celle de Pahl *et al.* tel que représenté par la Figure-A III-6. Néanmoins, le lien avec l'approche systématique a été établi sur la base de notre compréhension. Salminen et Verho s'appuient sur des méthodes telles que la QFD, les listes de contrôle – *checklist* –, l'analyse/conception structurée – *structured analysis/design* – appuyée par des diagrammes de contexte et de flux – *context diagram* et *flow diagram* –, et

encouragent l'utilisation de techniques de génération d'idées – bloc *Idea generation techniques* – dans la Figure 5.4. Ces techniques sont le remue-méninges – *brainstorming* –, la méthode 6-3-5, « idea bee », « double team method », Synectique, la matrice d'idées – *Idea matrix* –, et les catalogues de design (Salminen et Verho, 1992). Pour de plus amples informations sur les VDI 2221 et VDI2222, il est possible de consulter Jänsch et Birkhofer (2006). Également présenté comme se référant à l'approche systématique, Zou et Du, introduisent une nouvelle représentation fonctionnelle par laquelle leur *cube model* est défini. Le *cube model* peut être envisagé comme une amélioration du modèle systématique de Pahl *et al.* pour soutenir le raisonnement fonctionnel lors de la conception (Zou et Du, 2013).

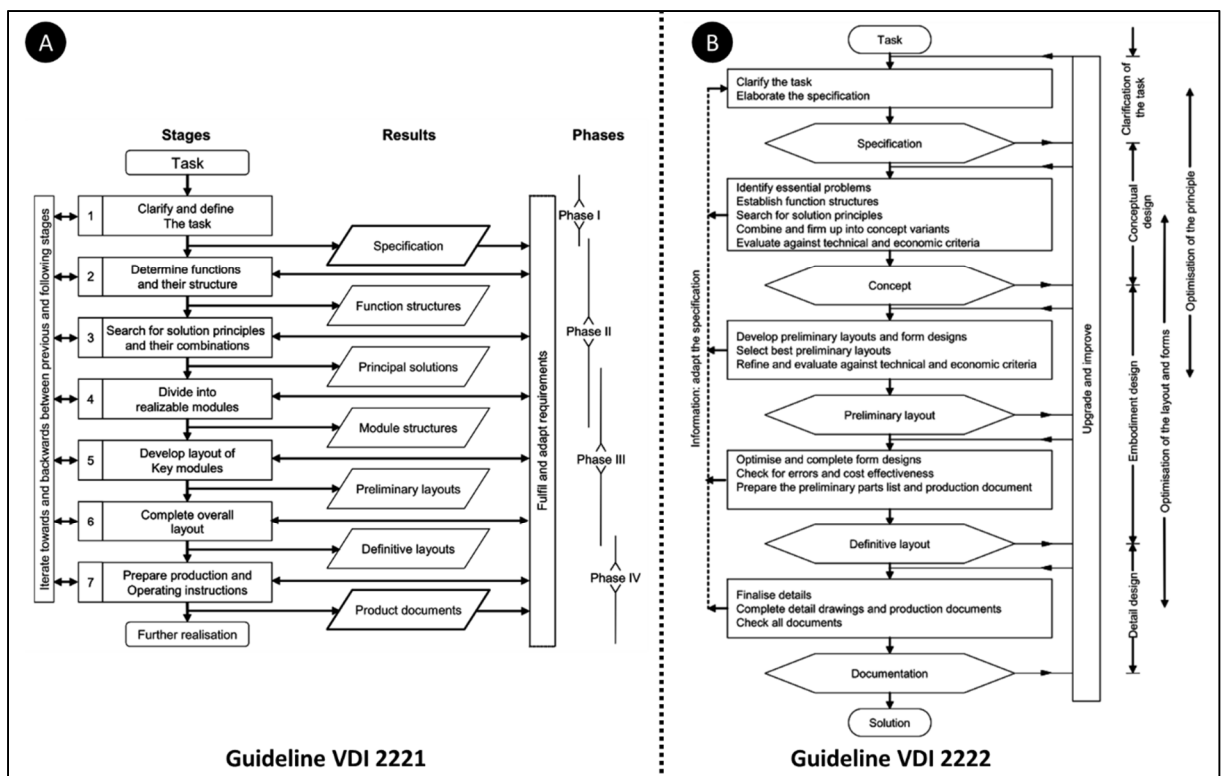


Figure-A III-6 Illustration des processus de conception systématique issus des VDI 2221 (A) et VDI 2222 (B)

Tirée de Jänsch et Birkhofer (2006)

Dans le cadre de l'approche systématique, le modèle en spirale est également proposé pour soutenir la conception mécatronique (Chan et Leung, 1996). Le modèle en cascade – *Waterfall* – est également mentionné, et défendu comme un modèle en spirale amélioré qui intègre l'ingénierie simultanée. Dans le cadre de la cartographie, le modèle en cascade est soutenu par (Royce, 1970). Ces deux processus, en spirale (A) et en cascade (B) sont représentés ci-dessous par la Figure-A III-7.

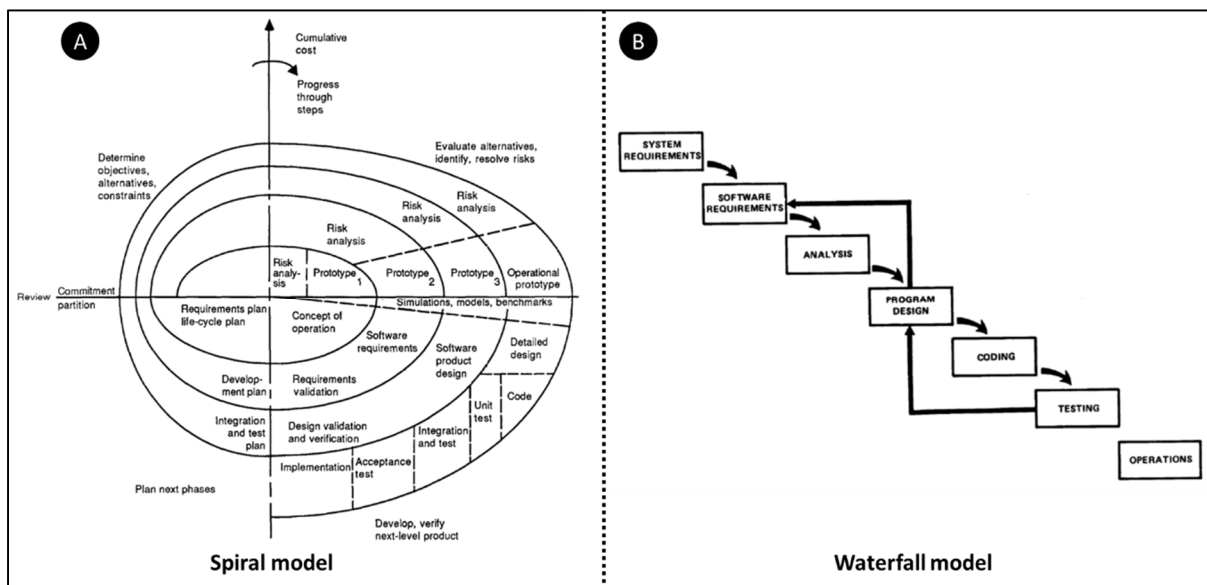


Figure-A III-7 Illustration des processus « Spiral » (A) et du processus « en cascade – *Waterfall* » (B)
 Respectivement tirées de Boehm (1988) et de Royce (1970)

Enfin, à noter que cette approche de conception systématique peut être rapportée à une approche qualifiée de « traditionnelle » du développement de produits, et est donc possiblement amenée à évoluer au profit d'autres approches (Hehenberger, 2015).

Ces concepts et techniques sont regroupés sur la Figure 5.4. Les concepts et techniques se référant à l'approche de conception systématique sont identifiés avec un rectangle vert.

III-8 Conception axiomatique et concepts et techniques apparentés

La conception axiomatique a été initialement proposée par Suh (1998). Cette approche repose sur deux axiomes, huit corollaires et vingt-sept théorèmes. De plus, elle repose sur une navigation et une association successive entre quatre domaines dénommés « Customer domain », « Functional domain », « Physical domain » et « Process domain ». Le « Customer domain » s'appuie sur des « Customer attributes » (CAs), le « Functional domain » sur des « Functional requirement » (FRs) et contraintes, traduisant les exigences et besoins clients. Le physical domain s'appuie sur les « design parameters » (DPs), cherchant à satisfaire les FRs. Enfin, le « process domain » s'appuie sur les « process variables » (PVs) afin de produire le produit défini en termes de DPs (Suh, 1998). Cela est illustré par la Figure-A III-8.

Xu et Zou s'appuient sur la conception axiomatique et proposent une extension pour les systèmes mécatroniques – *Axiomatic extensions* (Figure 5.5) – qui se traduit par deux sous-catégories des paramètres de conception (DPs) que sont les « structure parameters » et les « time-domain parameters » (Xu et Zou, 2007). Farid et Ribeiro (2015) proposent de s'appuyer sur la conception axiomatique pour le développement des systèmes mécatroniques reconfigurables multi agents. Janthong, Brissaud et Butdee (2010) proposent quant à eux d'utiliser la conception axiomatique dans le cadre d'un processus de conception systématique (Figure 5.4). Dans ce cas précis, Pahl *et al.* (2007) sont cités pour le processus de conception systématique qui est interprété comme un processus de type « étape-jalon ». La conception axiomatique se place alors comme un sous-élément du processus et est ainsi employée comme une méthode, un usage dérivé de la conception axiomatique – *Axiomatic used as a method*. La conception systématique est ainsi utilisée pour structurer le processus en plusieurs étapes, tandis que la conception axiomatique prend en charge la décomposition et la correspondance entre les structures fonctionnelles (FRs) et physiques (DPs). Ces structures de FRs et DPs peuvent être stockées dans une bibliothèque de cas. Sur la base d'un raisonnement à base de cas – *case-based reasoning* –, les auteurs proposent de réutiliser ces briques de connaissances que sont les structures de FRs et de DPs, cela afin de réutiliser des solutions

déjà développées par le passé, intégralement ou non. Ainsi, selon nous, à travers le raisonnement à base de cas, les auteurs proposent de s'appuyer sur l'ingénierie à base de connaissances (Janthong, Brissaud et Butdee, 2010). La conception axiomatique est également étendue par Schuh, Rudolf et Breunig (2016) pour la conception de plateformes de produits modulaires dans les systèmes mécatroniques. Selon notre compréhension, une conception modulaire est permise à travers l'extension de la conception axiomatique qui inclut le « mechatronic function module ». De plus, les auteurs mentionnent le cycle en V et l'application possible de la QFD pour dériver les exigences fonctionnelles (FRs) des attributs du client (CAs) (Schuh, Rudolf et Breunig, 2016). Enfin, d'une manière générale, étant donné que seul le développement de produits est abordé, la plupart des auteurs mentionnés ci-dessus ne traitent que des domaines fonctionnels et physiques (Schuh, Rudolf et Breunig, 2016).

Toujours en lien avec l'approche de conception axiomatique, Hehenberger *et al.* (2010) proposent un modèle de conception hiérarchique pour soutenir la décomposition et l'association des exigences fonctionnelles (FRs) aux paramètres de conception (DPs). Le modèle de conception hiérarchique a été adapté spécifiquement pour accompagner le développement de produits mécatroniques. En outre, le processus de conception mécatronique cité par l'auteur est apparemment le cycle en V. À propos de la modélisation hiérarchique, Hehenberger aborde également différentes techniques (Hehenberger, 2014). En conséquence, l'auteur présente différentes méthodes telles que la conception orientée fonction – *function-oriented design* – qui peut être combinée avec des méthodes de management de la qualité totale – *Total Quality Management* (TQM), rectangle jaune clair – telle que la QFD, ainsi que la conception basée sur les modèles, et le *property-driven development* (nommé *property-driven development/design* par l'auteur). En ce qui concerne les outils, les niveaux d'abstraction pour la décomposition système – *Levels of abstraction for system decomposition* – et la DSM sont également présentés. Liée aux niveaux d'abstraction pour la décomposition système, l'auteur cite la modélisation basée sur les caractéristiques – *feature-based modelling* –, considérée ici comme un outil (Hehenberger, 2014). Basée sur les références employées dans l'article de Hehenberger, la modélisation basée sur les caractéristiques est liée au processus Étape-jalon et

à l'approche de conception systématique de *Pahl et al.* (Brunetti et Golob, 2000). Toutefois, Brunetti et Golob (2000) ne traitent pas du développement de produits mécatroniques.

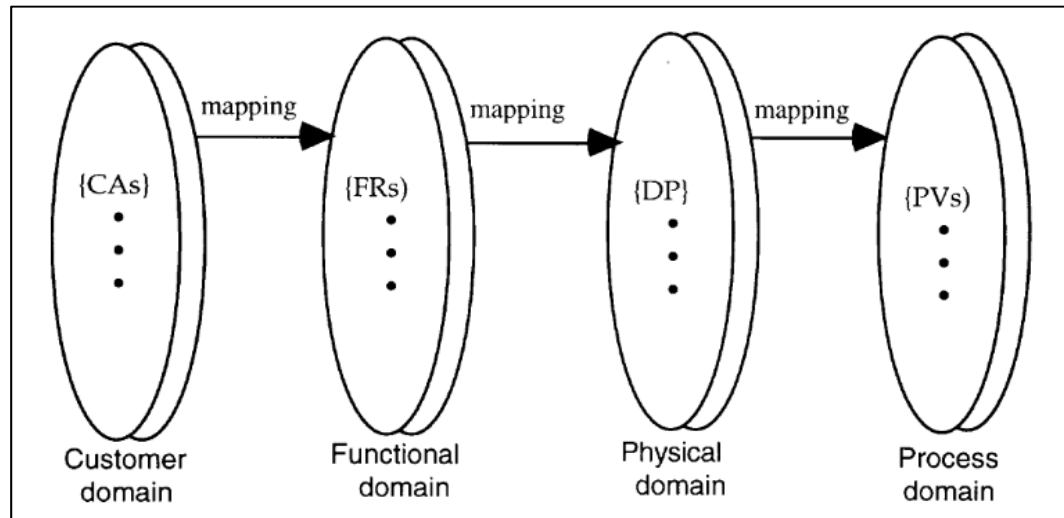


Figure-A III-8 Illustration de la conception axiomatique : navigation entre les quatre domaines
Tirée de Suh (1998)

Enfin, Alvarez Cabrera *et al.* remettent en question l'application de la conception axiomatique aux produits mécatroniques en déclarant que « mechatronic products implement an increasing number of functionalities while maintaining constraints on space and costs, and thus, a tight integration of the subsystems is desirable, which makes it harder to obtain functional independence » (Alvarez Cabrera *et al.*, 2010).

Ces différents concepts et techniques sont illustrés sur les Figure 5.4, Figure 5.5 et Figure 5.6. Les concepts et techniques se rapportant à l'approche de conception axiomatique sont identifiés par un rectangle bleu clair.

III-9 Éco-conception et concepts et techniques apparentés

Plus récemment, l'approche éco-conception semble avoir gagné en intérêt au sein du développement mécatronique avec les travaux de Merschak et Hehenberger (2019). Dans leur

article, les auteurs abordent l'intégration des pratiques d'éco-conception telles que les lignes directrices et les règles – *guidelines and rules* –, l'analyse rapide du cycle de vie – *Rapid Lifecycle assessment* – et l'analyse détaillée du cycle de vie – *Detailed Lifecycle assessment* (Merschak et Hehenberger, 2019). L'analyse détaillée du cycle de vie a été considérée comme une analyse du cycle de vie « classique » et est donc associée au bloc – *Lifecycle Assessment (LCA)*. Dans une direction similaire, Favi *et al.* (2019) proposent d'utiliser la conception pour le désassemblage (DfD) pour les produits mécatroniques appliquée par le biais de règles et de lignes directrices, pouvant s'inscrire dans l'approche éco-conception tel que suggéré par la ligne en trait interrompu sur la Figure 5.6. Certains auteurs proposent également d'autres lignes directrices sur la conception pour X – *Design for X (DfX)* – afin de soutenir le développement de produits mécatroniques. Marconnet *et al.* (2017) proposent d'employer la conception pour la fabrication et l'assemblage (DfMA). Kiran, Clement et Agrawal (2011), quant à eux, déploient de manière simultanée huit « capacités » DfX que sont la conception pour l'intégration, pour la miniaturisation, pour la fabrication, pour l'assemblage, pour l'intelligence, pour l'environnement, pour la fiabilité et pour la qualité. Chacune d'entre elles est représentée par des paramètres de conception qui, dans certains cas, sont spécifiés pour le génie mécanique, électrique/électronique et logiciel. Ces huit DfX sont représentées de manière cyclique au sein de la cartographie.

Les concepts et techniques susmentionnés sont représentés sur la Figure 5.6. Les concepts et techniques apparentés à l'éco-conception sont identifiés par un rectangle vert foncé.

III-10 Développement de produits intégré

Le développement de produits intégré – *integrated product development (IPD)* – a été proposé par Olsson³⁰ en 1985 puis enrichi par Andreasen et Hein (Andreasen et Hein, 1987 ; Vajna *et al.*, 2005). Tel que représenté par Andreasen et Hein à travers la Figure-A III-9, l'IPD

³⁰ Article en suédois : Olsson, F., Integrerad produktutveckling, 1985 (Mekanförbundet: Stockholm)

conceptualise une intégration et une mise en parallèle du développement de produits, du développement commercial, et du développement de la production. L'IPD est considéré comme un processus, accompagnant le développement de produits depuis le besoin jusqu'au produit commercialisable. Au sein de nos cartographies, l'*Integrated Product, Process and Manufacturing System Development Reference Model* (IPPM), une déclinaison de l'IPD, est considéré comme agnostique des approches, bien que ce dernier pourrait être perçu comme une variante du développement systématique de par sa structure en étapes.

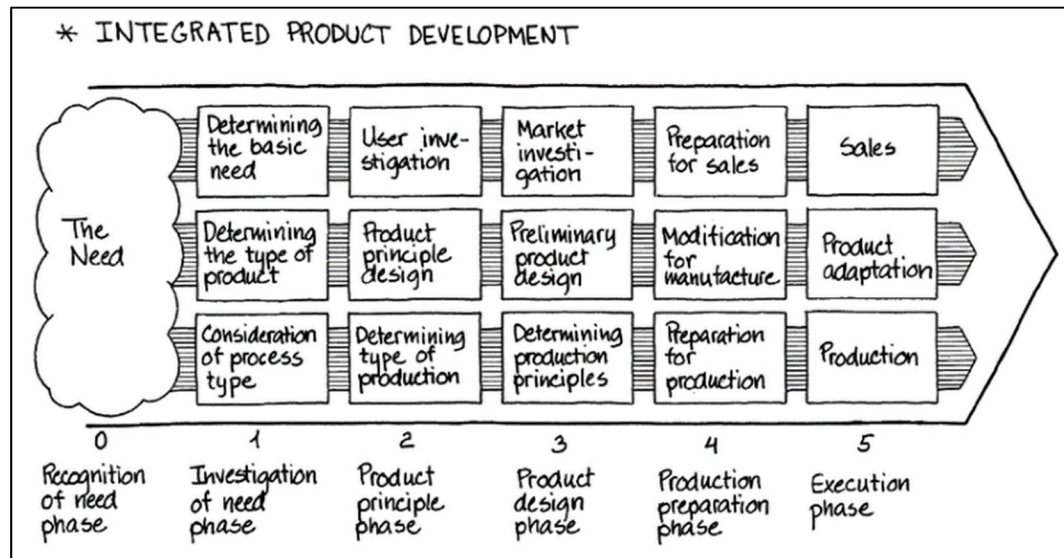


Figure-A III-9 Illustration du développement de produits intégré
Tirée de Andreasen et Hein (1987)

Différents auteurs encouragent l'intégration de différents points de vue dans le développement des produits. En ce sens, Pérez-Rodríguez *et al.* (2018) proposent d'utiliser l'IPPM combiné avec DSM, Kano et QFD pour « l'analyse des exigences fonctionnelles ». En ce qui concerne Kano, les auteurs ne fournissent pas suffisamment d'informations sur son utilisation pour le classer. Cependant, la référence utilisée par les auteurs a permis de considérer Kano comme une méthode, soutenue par des outils tels que le *Kano questionnaire*, le *Kano evaluation table* et le *Kano category result* (Violante et Vezzetti, 2017). Ces trois outils n'étant pas mentionnés pour appuyer le développement mécatronique, ils ne sont pas représentés dans les

cartographies. L'IPPMD est considéré ici comme un processus. En effet, l'IPPMD aspire à organiser simultanément l'ensemble du développement d'un produit conjointement avec les développements des processus de fabrication et le développement du système de production. Dans une direction similaire, Gausemeier *et al.* (2011) proposent un développement intégré à travers le *3-Cycle-Model*, représenté par la Figure-A III-10, qui vise à traiter l'ensemble du développement de produits « au plus haut niveau d'abstraction ». Le *3-Cycle-Model* est donc considéré comme un processus. Ce processus intégré englobe les développements de l'entreprise, du produit et de la production ainsi que leurs différentes relations et synchronisations. Toujours en rapport avec l'intégration du produit et de la production, Lukei *et al.* (2016) proposent de concevoir simultanément le produit et l'équipement de production sur la base de cycles en V concurrents et reliés, et du *Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems* (CONSENS), une méthode de type MBSE. Selon les auteurs, les produits conçus sont destinés à être modulaires et la méthode MBSE est utilisée en ce sens pour soutenir cette modularisation (Lukei *et al.*, 2016). Ces concepts et techniques sont représentés sur les Figure 5.5 et Figure 5.6.

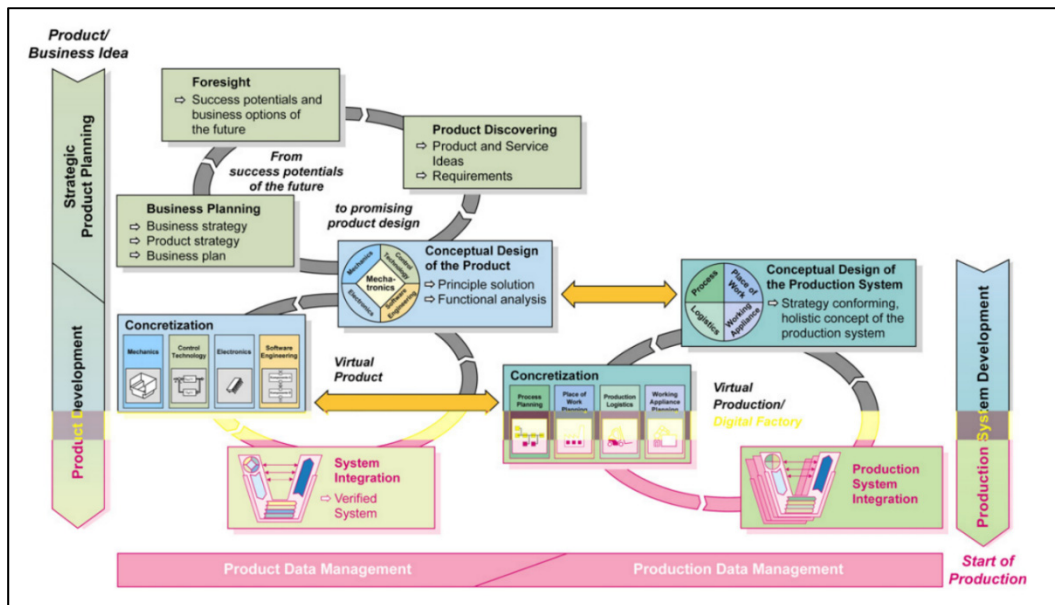


Figure-A III-10 Illustration du *3-Cycle-Model*
Tirée de Gausemeier *et al.* (2011)

III-11 Autres concepts et techniques

Pour la prise en considération de la sécurité ainsi que de l'évaluation des risques plus tôt dans le processus de conception, Sierla *et al.* (2012) proposent le *Functional Failure Identification and Propagation framework*. Ce *framework* s'appuie sur un modèle fonctionnel du système, un modèle de configuration et un modèle comportemental. Il est proposé en vue de compléter l'arbre d'analyse des défaillances – *Fault Tree Analysis* – et l'AMDE – *FMEA* – (Sierla *et al.*, 2012). Sierla *et al.* (2012) sont représentés sur la Figure 5.3. Pour traiter des problèmes de fiabilité des systèmes mécatroniques, Kaul, Meyer et Sextro (2017) proposent un modèle intégré englobant un modèle comportemental – qui est un sous-ensemble du modèle système – et un modèle de fiabilité appuyé par un réseau bayésien. Pour une conception optimale et robuste, Amuthakkannan (2012) s'appuie sur la mise en œuvre des techniques de Taguchi. Ces concepts et techniques sont représentés sur la Figure 5.6.

Cette annexe a passé en revue les divers concepts et techniques proposés par la littérature scientifique pour soutenir le développement de produits mécatroniques. Sur la base de ces concepts et techniques, une représentation graphique a été établie et est présentée à la section 5.2.

ANNEXE IV

LE DÉVELOPPEMENT DES SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES

Cette annexe présente d'une manière approfondie les différents concepts et techniques discutés au sein du corpus de la littérature scientifique retenu pour accompagner le développement des SCP. Ces différents concepts et techniques, détaillés au cours des prochaines sections, ainsi que les liens identifiés entre eux ont permis de constituer la cartographie correspondante représentée par les Figure 5.8 et Figure 5.9. Cette annexe vient donc compléter les éléments présentés au CHAPITRE 5.

La section IV-1 aborde la conception centrée sur l'humain et l'utilisateur et des concepts et techniques connexes, en introduisant l'IS et le cycle en W. Les sections IV-2 et IV-3 complètent les pratiques liées à l'IS avec l'introduction respectivement de pratiques basées et dirigées par les modèles et de techniques de modélisation. La section IV-4 traite des concepts et techniques Agile. La section IV-5 présente le triptyque de *Platform-based design* (PBD), conception basée sur les composants et sur les contrats, ainsi que les concepts et techniques adjacents. Enfin, la section IV-6 traite de divers concepts et techniques.

D'une manière similaire à l'annexe précédente, à la fin de chaque section, il est fait mention des figures qui contiennent les concepts et les techniques abordés. Par conséquent, pour retrouver sur la cartographie un concept ou une technique et sa référence à partir de l'énumération textuelle, il faut d'abord rechercher les figures mentionnées, puis le concept ou la technique. La référence est positionnée proche du bloc ou le long des liens connectés au bloc.

IV-1 Conception centrée sur l'humain, l'utilisateur et concepts et techniques apparentés

Pour soutenir les entreprises désireuses de passer des produits physiques aux SCP, Broy et Schmidt (2014) proposent que les entreprises réinventent « leurs processus d'innovation et de développement et adoptent une approche d'ingénierie centrée sur l'utilisateur ». Seshia *et al.* (2017) soulignent également l'importance de la prise en considération de l'humain dans la boucle de contrôle ainsi que dans la conception de l'IHM. En effet, pour les auteurs, les SCP sont des produits interactifs et l'humain peut jouer un rôle dans le fonctionnement du produit. Les auteurs conceptualisent à ce titre les « human CPS » qui se distinguent des SCP entièrement autonomes. Bien que Seshia *et al.* (2017) ne mentionnent pas expressément l'usage d'une conception centrée sur l'humain, leur intention pourrait s'en rapprocher. Une direction similaire est adoptée pour les SCP à destination du secteur de la santé à travers des méthodes telles que la conception centrée sur l'utilisateur – *user-centered design* (Wrobel *et al.*, 2015) – ou sur l'humain – *human-centered design* (HCD) (Dimitrov *et al.*, 2015). Merlo *et al.* (2019) proposent de combiner la conception centrée sur l'utilisateur/l'humain et les méthodes de créativité au sein d'une approche IS par l'intermédiaire d'un cycle en W. Ainsi, Merlo *et al.* (2019) proposent une approche, un processus et des méthodes pour le développement des SCP.

Les concepts et techniques discutés dans cette section sont représentés sur la Figure 5.8.

IV-2 Pratiques basées sur les modèles et concepts et techniques apparentés

D'autres auteurs soutiennent l'idée que des changements sont nécessaires pour développer ces nouveaux produits que sont les SCP (Anderl, 2014 ; Fitzgerald *et al.*, 2015 ; Song *et al.*, 2019). Fitzgerald *et al.* (2015) formulent des recommandations concernant le processus de conception et l'ingénierie des SCP. Ces auteurs se concentrent sur une « integrated tool chain for model-based CPS », qui intègre la modélisation, l'analyse, la simulation, les tests, ainsi que l'implémentation. Cette « tool chain » se traduit sur notre cartographie comme l'usage conjoint

des pratiques basées sur les modèles – bloc *Model-based and model-driven practices* – soutenues par les techniques de modélisation système – bloc *System modelling techniques*.

La modélisation comme outil pour le développement des SCP a été proposée par différents auteurs. En ce sens, Jensen, Chang et Lee (2011) proposent une conception basée sur les modèles en dix étapes pour les SCP, incluant les aspects logiciels et matériels, ainsi que les aspects relatifs à leur vérification, validation, leurs tests et leur simulation. Rajkumar *et al.* (2010) discutent de l'utilisation du développement basé sur les modèles, ainsi que de la nécessité d'intégrer la vérification et la validation. Les auteurs précisent que non seulement la partie logiciel doit être modélisée, mais également les « communications, computing and physical dynamics », couvrant ainsi une partie des nouvelles capacités des SCP (Rajkumar *et al.*, 2010). De même, Ishigooka *et al.* (2017) utilisent le développement basé sur les modèles associé à la simulation HIL – bloc *Model/Hardware/Software-in-the-loop simulation and tests* – et aux graphes de liaison – *bond graphs* pour les SCP ayant une forte considération de sécurité. Dans le même ordre d'idées, certains chercheurs encouragent également l'utilisation du développement et de l'analyse basés sur les modèles et soutenus par des techniques de modélisation système (Kang, Seo et Kim, 2019 ; Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012). Selon Pietrusewicz, le développement basé sur les modèles est utile lorsque « the modelled system is large, complex or cross-domain in nature » (Pietrusewicz, 2019).

Déjà abordé au chapitre 3, Paetzold (2017) aborde l'usage du MBSE – intégré au bloc *Model-based and model-driven practices* – pour le développement des SCP. Deux variantes de MBSE sont également discutées qui sont OOSEM (acronyme de *Object-oriented Systems Engineering Method*) et « SYSMOD ». Le MBSE s'inscrit dans une perspective plus large portée par le cycle en V, s'intégrant à son tour dans l'approche IS. Enfin, MBSE peut s'appuyer sur des techniques de modélisation système.

En utilisant les possibilités offertes par la collecte de données, Seshia *et al.* (2017) proposent de combiner la conception basée sur les modèles avec la conception dirigée par les données –

data-driven design. En effet, dans le cas de SCP déployés dans un environnement hautement incertain et variable, la conception basée sur les modèles peut trouver ses limites du fait que l'environnement devient difficile à modéliser. Ainsi, la combinaison proposée permet à la conception basée sur les modèles de bénéficier des données collectées depuis l'environnement, ce qui permet un apprentissage du système. Le système, tel que la voiture autonome, est alors adapté à opérer et évoluer dans un environnement incertain. Cette intégration est également discutée par Sztipanovits *et al.* (2018) comme une opportunité de recherche. La conception dirigée par les données pourrait être considérée comme soutien à la conception basée sur les modèles, et ainsi être classée comme un outil. Cependant, la conception dirigée par les données peut être envisagée comme une pratique d'ingénierie et classerait ainsi cette dernière comme une méthode. En effet, Seshia *et al.* (2017) proposent de combiner la conception dirigée par les données avec la conception basée sur les modèles, les rendant complémentaires. C'est cette seconde option qui a été adoptée et représentée dans la cartographie – voir Figure 5.8. Toujours en ce qui concerne l'amélioration des pratiques basées sur les modèles, Isasa, Larsen et Hansen (2017) se concentrent sur l'intégration des préoccupations de consommation d'énergie dans le développement basé sur les modèles. La modélisation peut être réalisée par un graphe de liaisons – *Bond graph*. Les auteurs positionnent également leurs travaux dans un cycle en V (Isasa, Larsen et Hansen, 2017).

Pour le développement de SCP fiables et robustes, Fu, Choosilp et Dong (2018) envisagent la combinaison d'une conception basée sur les modèles reposant sur l'UML couplée aux développements pilotés par les tests – *test-driven development* (TDD) – et à l'intégration continue – *continuous integration*. Akkaya *et al.* (2016) proposent quant à eux d'utiliser la conception basée sur les modèles combinée avec des techniques de modélisation orientée aspect – *Aspect-oriented modelling techniques*. La programmation orientée aspect – assimilée à la modélisation orientée aspect – est également utilisée avec l'architecture dirigée par les modèles (Liu et Zhang, 2011 ; Zhang, 2011a ; Zhang, 2011b). Cette combinaison vise à améliorer la modularité des systèmes et à gérer la complexité et les exigences non fonctionnelles.

Sztipanovits *et al.* (2018) présentent la suite d'outils OpenMETA pour soutenir la conception basée sur les modèles et la conception basée sur les composants – *component-based design*³¹ – pour le développement des SCP. Par ailleurs, les auteurs défendent la réutilisation des connaissances de conception – consignée dans le bloc *knowledge-based design* dans la cartographie – stockées dans une bibliothèque de modèles de composants. Dans le même ordre d'idées, INTO-CPS est une chaîne d'outils intégrée pour soutenir l'analyse et la conception basées sur les modèles qui intègre également la simulation HIL et SIL (Larsen *et al.*, 2016).

Par conséquent, les pratiques basées sur les modèles, telles que le développement basé sur les modèles (Gao, Xia et Dai, 2011 ; Hoxha, Dokhanchi et Fainekos, 2018 ; Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 ; Pietrusewicz, 2019), la conception basée sur les modèles, l'architecture dirigée par les modèles, ou encore le MBSE sont des méthodes reconnues pour soutenir le développement des SCP. Ces différentes méthodes sont regroupées dans le bloc *Model-based and model-driven practices*. Cette reconnaissance pourrait émerger du fait que les pratiques basées sur les modèles permettent de gérer la complexité et d'effectuer la vérification/validation plus tôt dans le développement (Seshia *et al.*, 2017). Bien qu'une direction commune semble se profiler au sein de la littérature scientifique sur l'utilisation des pratiques basées sur les modèles, certains auteurs prennent une direction contraire. Raghav et Gopalswamy affirment que « model-based development approaches are inadequate for complex CPS » et proposent en conséquence d'utiliser un développement dirigé par l'architecture – *Architecture Driven development* (Raghav et Gopalswamy, 2009).

Ces différents concepts et techniques sont en majorité représentés sur la Figure 5.8, exception faite des travaux de Sztipanovits *et al.* (2018) et Raghav et Gopalswamy (2009), représentés sur la Figure 5.9.

³¹ À noter que pour la mécanique, *components-based design* avait été cité par Mahalik *et al.* (2006), mais semble différer du *component-based design* utilisé pour le développement des SCP. Les cartographies du développement mécanique et SCP font la distinction entre les deux. Néanmoins, la traduction française adoptée est la même.

IV-3 Techniques de modélisation

La modélisation système joue un rôle important dans le développement des SCP (Darwish et Hassanien, 2018). En effet, la modélisation est une manière possible d'appréhender la complexité croissante des produits (Alur, 2015 ; Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013). Comme suggéré dans la section précédente, la mise en œuvre de pratiques basées sur les modèles nécessite généralement la mise en œuvre de techniques et de langages de modélisation. En ce sens, Alur (2015) traite de la conception basée sur les modèles opérationnalisée par des techniques de modélisation système – *system modelling techniques*. De même, Rauniyar et Tanik (2010) déclarent que l'UML « provides the foundation of the Model-Driven Architecture ». Slomka *et al.* (2011) se concentrent sur la modélisation système pour la construction d'architectures à travers un nouveau langage de description des systèmes qui introduit des symboles pour la communication, les interfaces et les exigences. Cette opportunité de créer de nouvelles techniques de modélisation – langages et outils – afin de « spécifier, analyser, synthétiser et simuler différentes compositions » est également discutée par Rajkumar *et al.* (2010).

Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.* (2016) étudient le développement des SCP du point de vue du modèle et de la modélisation. À ce titre, des techniques permettant de soutenir les premières phases de conception sont énumérées et séparées entre la phase de *conceptual design* et celle de modélisation du système. Pour la phase de *conceptual design*, mais également la conception fonctionnelle et architecturale, les auteurs s'appuient sur du MBSE qui peut être soutenu par le SysML ou l'*Architecture Description Language* (ADL) – intégrés au bloc *System modelling techniques*. Au sein de la famille ADL, d'autres chercheurs utilisent l'*Architecture Analysis and Design Language* (AADL) (Liu *et al.*, 2018 ; Liu et Wu, 2019) – intégré au bloc *System modelling techniques*. De plus, le langage et les bibliothèques Modelica peuvent également soutenir la modélisation et la simulation, en s'appuyant sur des modèles mathématiques (Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.*, 2016). En lien avec la phase de modélisation du système,

les auteurs discutent de l'utilisation de logiciels commerciaux tels que MATLAB³² et AMESim³³, dont le principal avantage réside dans l'utilisation de bibliothèques pour faciliter la modélisation. Toujours en lien avec la modélisation, Attarzadeh-Niaki et Sander (2016) proposent le *framework ForSyDe* qui s'appuie sur le langage SystemC pour modéliser et simuler des systèmes complexes – intégré au bloc *System modelling techniques*. Graja *et al.* (2018) proposent quant à eux une étude sur les techniques de modélisation système – *System modelling techniques* – pour le développement des SCP.

Penas *et al.* (2017) se concentrent sur les pratiques de modélisation et sur la manière dont ces pratiques peuvent contribuer au développement des SCP. Les chercheurs envisagent la conception des SCP comme une adaptation possible de la conception mécatronique. Cette adaptation des pratiques a pour but prendre en compte les éventuelles différences entre mécatronique et SCP (Penas *et al.*, 2017). Les auteurs adoptent un point de vue « Systems engineering » afin de considérer le cycle de vie complet du produit. Les auteurs mobilisent également différentes méthodes, dont le MBSE pour sa prise en compte des considérations multivues. Le MBSE est lui-même appuyé par la modélisation SysML permettant de représenter les structures dynamiques des SCP. La modélisation SysML est également employée par les auteurs pour soutenir l'analyse en boîte noire et boîte blanche – *Black box and white box analyses*. La modélisation orientée objet est mentionnée pour fournir des modèles comportementaux utilisant la modélisation causale – comme Simulink et 20-sim³⁴ – ou la modélisation acausale avec Dymola/Modelica. Pour modéliser les interactions entre les sous-systèmes, le *port-based modelling* est introduit et mis en œuvre à travers les diagrammes SysML. La modélisation topologique – *Topological modelling* – est également discutée en vue d'aborder la complexité à travers l'utilisation de la théorie des graphes et en particulier le graphe orienté – *digraph* ou *directed graph* – pour représenter les structures hiérarchiques des SCP.

³² <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

³³ <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/products/simcenter/simcenter-amesim.html>

³⁴ <https://www.20sim.com/>

En lien avec les techniques de modélisation, Knap, Mączak et Trojgo (2018) étendent l'application de la modélisation orientée processus – *process-oriented modelling* –, issue de la gestion des organisations, au développement des SCP. Pour la conception de SCP disposant d'une capacité d'autoadaptation, García-Valls, Perez-Palacin et Mirandola (2018) accompagnent cette capacité durant l'usage du produit par l'intermédiaire de modèles paramétriques, tandis que la modélisation et la vérification s'appuient sur les réseaux de Petri – *Petri nets*. Letia et Kilyen (2018) s'appuient également sur les réseaux de Petri combinés à la logique floue et aux systèmes à base de règles pour proposer des modèles *Unified Enhanced Time Petri Nets*. Sur la cartographie, cela apparaît comme une dérivation des réseaux de Petri.

Bures *et al.* (2018) soulignent que la modélisation est générale et peut englober différentes finalités. La modélisation peut ainsi être effectuée à des fins d'analyse fonctionnelle ou de vérification, ce qui est bien documenté par la littérature d'après les auteurs. À l'inverse, selon les mêmes auteurs, la modélisation à des fins d'analyse des performances demeure négligée. Bures *et al.* (2018) proposent en conséquence une évaluation des performances des SCP basée sur les modèles – *model-based performance evaluation*. La modélisation ontologique – bloc *Ontological modelling* – et « l'orientation agent » – bloc *Agent-based modelling* – peuvent également compléter la liste des concepts et techniques pour la modélisation des SCP (Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.*, 2016). Penas *et al.* (2017) discutent de l'utilisation de la modélisation multi-agents qui est intéressante de par : « complexity management, flexibility, robustness, adaptation and reconfigurability ». En effet, l'orientation agent, telle que qualifiée par Hehenberger, Vogel-Heuser, *et al.* (2016), est reconnue pour son efficacité en ce qui concerne la complexité et l'« agent orientation as a modelling and engineering paradigm is currently completely applicable ». Sur la base du « paradigme agent », Carni *et al.* (2017) proposent et emploient une architecture basée sur les agents. L'orientation agent pour le développement des SCP est également discutée par Hu *et al.* (2016) et envisagée par Merlo *et al.* (2019) pour modéliser et simuler les SCP. Pour soutenir le développement de systèmes multi-agents pour l'architecture logicielle, Sini *et al.* (2018) proposent de s'appuyer sur une combinaison de techniques « model-based software design » – assimilée au *model-based*

design dans la cartographie –, associées au *Model/Software/Hardware-In-The-Loop* pour la simulation et structurées séquentiellement dans un flux de travail itératif (Sini, Violante et Dessi, 2018). L'utilisation des agents en tant que pratique de modélisation ou à des fins d'architecture des SCP semble gagner en importance au sein de la littérature. Il convient de noter que cette orientation agent, au même titre que l'intégration continue et le TDD mentionnés ci-dessus, sont issus de l'ingénierie logicielle. Également liés aux pratiques de l'ingénierie logicielle, Tariq, Florence et Wolf (2018) font usage d'une *Service-Oriented Development Methodology*, classée comme une méthode au sein de notre cartographie.

Les techniques présentées dans cette section sont représentées sur les Figure 5.8 et Figure 5.9.

IV-4 Développement de produits Agile et concepts et techniques apparentés

Comme pour la mécanique, des concepts et des techniques issus de l'ingénierie logicielle sont utilisés pour le développement des SCP. L'approche Agile est sous-entendue par certains auteurs sans être expressément nommée. Au sein de la cartographie des SCP, et pour améliorer la compréhension, le bloc de l'approche Agile est ajouté et s'appuie sur le Manifeste Agile (Beck *et al.*, 2001). Au niveau processus, une adaptation de Scrum (Schwaber, 1997) peut être utilisée pour gérer la conception concourante matérielle et logicielle. Dénommée « Scrum CPS », cette adaptation s'appuie sur le développement basé sur les modèles qui, d'après notre lecture, repose sur l'usage de modèles et de simulations, et est ainsi lié aux techniques de modélisation système (Wagner, 2014). En ce qui concerne les outils mis en œuvre, Wagner (2014) aborde la simulation SIL et HIL. Enfin, « Scrum CPS » est soutenu par des *sprints* de conception et de matériel – *design sprints* et *hardware sprints* –, ainsi que par des *backlogs*.

Luedeke *et al.* (2018) proposent également l'*Agile product development* pour mener à bien le développement des SCP, associé au couple *Characteristics Properties Modelling / Property Driven Development* (CPM/PDD) pour la modélisation des produits et des processus (Baumeister, Knapp et Wirsing, 2004), et au *Design thinking* pour l'étape de créativité

(Luedeke *et al.*, 2018). Le CPM/PDD est basé sur l'extrait du *Design thinking* et est utilisé en parallèle de l'*Agile product development*. En complément, selon notre compréhension, le *Design thinking* est lié à la conception centrée sur l'humain. Cette association peut être étayée par les travaux de Mueller et Thoring (2012). Étant donné que l'utilisation du *Design thinking* ci-contre n'accompagne pas l'intégralité du développement du produit, mais un sous-ensemble de celui-ci – l'étape de créativité et d'idéation –, il est donc classé comme une méthode dans ce cas. De plus, le vocabulaire employé par les auteurs pour l'*Agile product development* – *backlog* et *sprint* – suggère que Scrum est utilisé lorsque les chercheurs parlent du processus de développement Agile – indiqué comme une dérivation de Scrum sur la Figure 5.8. Le *backlog* et le *sprint* sont considérés comme des outils de soutien du processus.

L'Extreme Programming (XP), un processus Agile, est également abordé par Escobar *et al.* (2017) pour le développement des SCP. En complément, XP est soutenu par les *user stories*, considérées comme un outil.

Les concepts et techniques Agile sont représentés sur la Figure 5.8.

IV-5 Conception basée sur les plateformes, le composant et le contrat

Zhu et Sangiovanni-Vincentelli (2018) discutent de différents *frameworks* pour soutenir le développement des SCP. Au-delà des *frameworks*, ce sont les concepts et techniques sous-jacents qui nous intéressent. Ainsi, pour soutenir le développement des SCP, les auteurs évoquent la conception basée sur les plateformes – *Platform-based design* (PBD) (Davare *et al.*, 2013 ; Sangiovanni-Vincentelli *et al.*, 2004) –, la conception basée sur les contrats – *contract-based design* –, la conception basée sur les modèles, la conception basée sur les composants – *component-based design* – ainsi que la modélisation fonctionnelle.

D'après notre compréhension, le PBD est perçu comme une méthode de « haut niveau » du fait qu'elle rassemble des pratiques d'ingénierie pour l'architecture et la décomposition des

systemes. Le PBD repose sur la mise en correspondance entre les spécifications et les implémentations potentielles à travers différentes couches d'abstraction. Chaque couche d'abstraction est qualifiée de *design platform* (Nuzzo *et al.*, 2015 ; Sangiovanni-Vincentelli *et al.*, 2004). En complément, le PBD peut être combiné avec la conception basée sur les contrats (Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012 ; Seshia *et al.*, 2017), ce qui permettrait de réduire la complexité de la conception. Les contrats sont définis comme des « mathematical models of the interface between components and levels of abstraction in a design » (Nuzzo *et al.*, 2019). Ainsi, selon notre lecture, la conception basée sur les contrats est liée à la conception basée sur les composants et au PBD – à travers la mention des « levels of abstraction ». Par ailleurs, d'autres auteurs considèrent les contrats comme « an essential aspect of component-based design and interface theories » (Derler *et al.*, 2013). De même, dans Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone (2012), bien que la notion de composants soit discutée au sein de la conception basée sur les contrats, le lien entre la conception basée sur les composants et la conception basée sur les contrats n'est pas formalisé. Pour des lectures complémentaires sur la conception basée sur les contrats et sur la façon dont elle complète la conception par composants, il est possible de consulter Benveniste *et al.* (2015).

En complément, il est également possible de distinguer les contrats verticaux et horizontaux (Nuzzo *et al.*, 2015 ; Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012). Les contrats horizontaux, également qualifiés de traditionnels, spécifient les propriétés des composants à un niveau d'abstraction donné et formalisent les conditions d'une intégration correcte. Les contrats verticaux sont quant à eux liés au raffinement entre deux niveaux d'abstraction du PBD (Nuzzo *et al.*, 2015 ; Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012). Ainsi, les contrats horizontaux sont relatifs aux composants – interprété comme soutenant la conception basée sur les composants – et les contrats verticaux au PBD (Nuzzo *et al.*, 2015). Nuzzo *et al.* (2015) mentionnent également que le PBD est basé sur une composition de composants. Ainsi, nous associons le PBD avec la conception basée sur les composants. De ce fait, nous esquissons une association triangulaire, référée ci-après comme étant le triptyque entre le PBD, la conception basée sur les composants et la conception basée sur les contrats.

Pour Seshia *et al.* (2017), le PBD et la conception basée sur les contrats fournissent un cadre pour la conception basée sur les composants. Bien que les auteurs n'établissent pas expressément de lien entre la conception basée sur les composants, le PBD et la conception basée sur les contrats, la conception basée sur les composants semble être associée aux deux. Par ailleurs, Seshia *et al.* (2017) soulignent également le défi de trouver les bons composants, la bonne composition et les bons contrats, étayant en ce sens le triptyque. Au-delà des liens formels, l'agencement du PBD, avec la conception basée sur les contrats et celle basée sur les composants peut également être lu de deux manières différentes, confirmant le triptyque. Ces deux lectures découlent de Nuzzo *et al.* (2015), Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone (2012) et Seshia *et al.* (2017). Une première lecture possible est de considérer qu'une plateforme est basée sur une composition de composants qui sont par la suite validés par des contrats en regard des propriétés souhaitées. Cette première lecture schématise l'idée que le PBD est lié à la conception basée sur les composants, qui à son tour est mise en correspondance avec la conception basée sur les contrats. Une deuxième lecture possible est qu'une plateforme, par l'entremise des contrats, agrège des composants prévérifiés. Cette seconde lecture permet de lier le PBD à la conception basée sur les contrats à la conception basée sur les composants. Dans la cartographie, les deux lectures sont représentées et leur combinaison vient renforcer le triptyque discuté au paragraphe précédent.

Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone (2012) abordent en complément de multiples concepts et techniques, à savoir la conception par couches – *layered design* – utilisée pour décomposer la complexité des systèmes « verticalement », la conception basée sur les composants pour réduire la complexité « horizontalement », le cycle en V employé comme processus, et la conception basée sur les modèles pour soutenir l'intégration virtuelle – *virtual integration*. Selon les auteurs, le PBD englobe les décompositions horizontales (conception basée sur les composants, et intégration virtuelle) et les décompositions verticales (conception basée sur les modèles et conception par couches). La conception basée sur les composants permet également d'envisager une stratégie de réutilisation, représentée dans notre cartographie à travers le bloc *reuse engineering* (Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone,

2012 ; Seshia *et al.*, 2017). Par ailleurs, cette réutilisation peut permettre de réduire l'effort de développement, à la fois dans les étapes de conception et d'intégration du cycle en V. Par conséquent, le cycle en V peut être soutenu par la conception basée sur les composants. De plus, l'intégration virtuelle prend également place au sein du cycle en V (Sangiovanni-Vincentelli, Damm et Passerone, 2012). Enfin, les auteurs associent, par le biais du contrat horizontal, l'intégration virtuelle avec la conception basée sur les contrats. En complément de la littérature précédemment évoquée jusqu'ici, les principes et pratiques basés sur les composants sont également abordés par Crnkovic *et al.* (2016).

À première vue lié aux pratiques basées sur les composants, le *component-based modelling* est proposé par Chen *et al.* (2015) afin de « model and verify complex digital logic components in CPS ». Cependant, cette modélisation basée sur les composants diffère des autres techniques basées sur les composants et est donc représentée séparément dans la cartographie. Dans un contexte automobile, Wan *et al.* (2017) proposent de transformer un modèle fonctionnel en modèles d'architecture qui peuvent être simulés et validés, permettant ainsi l'exploration de différentes architectures et de l'espace de solutions. La modélisation fonctionnelle s'appuie sur le langage *Functional Basis* et est organisée selon un arbre de décomposition fonctionnelle – *functional decomposition tree*. Par ailleurs, la modélisation fonctionnelle est considérée par Wan *et al.* (2017) comme étant « une activité d'ingénierie système », donc étant possiblement liée à l'IS. Sur la base du modèle fonctionnel, l'architecture est réalisée par la conception basée sur l'architecture – *architecture-based design* – également dénommée PBD par les auteurs. L'*architecture based-design* apparaît donc comme une dérivation du PBD dans la cartographie. L'architecture est construite par l'intermédiaire d'une bibliothèque de composants, laissant supposer l'utilisation de la conception basée sur les composants. Par ailleurs, les composants nouvellement créés peuvent être liés verticalement à d'autres niveaux d'abstraction, ou encore liés horizontalement à des composants existants par le biais des *design contracts*. Cela laisse entrevoir une utilisation de la conception basée sur les contrats, elle-même vraisemblablement liée à la modélisation fonctionnelle (Wan, Canedo et Al Faruque, 2017).

Ces concepts et techniques sont rassemblés sur la Figure 5.9.

IV-6 Autres concepts et techniques

Parmi les autres concepts et techniques proposés pour le développement des SCP, nous pourrions mentionner le *design for security and privacy* mentionné par Seshia *et al.* (2017) et représenté sur la Figure 5.9. Les auteurs insistent à cet effet que la prise en considération de ces deux aspects, et notamment la sécurité, doit se faire au plus tôt dans le processus de développement. D'une manière générale, bien que différents auteurs aient mentionné cette préoccupation de (cyber)sécurité, peu le formalisent à travers un concept ou technique dédiée.

Balasubramaniyan *et al.* (2016) proposent une « méthodologie » comportant trois « étapes » que sont la conception, la validation/simulation et la vérification. Selon notre compréhension, la « méthodologie » proposée s'apparente davantage à une procédure technique afin de parvenir à un compromis entre stabilité opérationnelle et performance. Cette « méthodologie » est donc assimilée à une méthode. Cette méthode inclut par ailleurs la modélisation des « timing imperfections ». Cette prise en compte de contraintes et imperfections temporelles se retrouve dans les travaux de Song *et al.* (2019) qui proposent une « méthodologie » en trois étapes que sont « la modularisation fonctionnelle, la mise en réseau pour le partage d'informations, et la coordination des éléments du système ». Selon nous, il s'agit davantage d'une méthode, car elle porte sur un sous-ensemble du développement du produit. La première étape se concentre sur la décomposition fonctionnelle en modules, la deuxième identifie les retards qui peuvent survenir et qui doivent être pris en compte lors de la conception du réseau, et la troisième décrit, par le biais d'interfaces unifiées, le partage d'informations et les interactions entre les modules. Les deux méthodes en trois étapes proposées respectivement par Balasubramaniyan *et al.* (2016) et Song *et al.* (2019) ne sont pas nommées. Elles sont représentées sur la Figure 5.9.

Cette annexe a présenté un aperçu de la variété des concepts et des techniques discutés au sein de la littérature pour soutenir le développement des SCP. Sur la base de ces travaux, une cartographie a été établie et est présentée à la section 5.3.

ANNEXE V

LE DÉVELOPPEMENT DES PRODUITS INTELLIGENTS

Les produits intelligents reflètent une récente tendance de l'évolution des produits bénéficiant de l'intégration de la connectivité et l'amélioration des technologies de l'information. Cette annexe présente les différents concepts et techniques discutés au sein du corpus de la littérature scientifique retenu pour accompagner le développement de produits intelligents. Sur la base de cette annexe, la cartographie représentée par les Figure 5.10 et Figure 5.11 a pu être établie. Cette annexe vient donc compléter les éléments présentés au CHAPITRE 5.

Tout d'abord, selon Herzog et Bender (2017), « le changement vers le paradigme des produits intelligents suggère que la manière actuelle de développer des produits doit être fondamentalement adaptée ». Cette recommandation est partagée par Porter et Heppelmann (2014) qui soulignent : « Smart, connected products require a whole set of new design principles, such as designs that achieve hardware standardization through software-based customization, designs that enable personalization, designs that incorporate the ability to support ongoing product upgrades, and designs that enable predictive, enhanced, or remote service ». Pour le développement de ces produits intelligents, les auteurs recommandent également le développement d'une expertise en IS et en développement logiciel Agile afin d'intégrer les différentes disciplines et leurs composants respectifs (Porter et Heppelmann, 2014). Ahram, Karwowski et Amaba (2011) proposent également l'utilisation de l'IS, mais dans une perspective de processus. Le processus est basé sur une série d'activités, incluant des activités de gestion de projet et de développement de produits adaptées du *Defense Acquisition University Guidebook*. Certaines de ces activités sont soutenues par la modélisation système réalisée en langage SysML.

Tomiya *et al.* (2019) explorent également le développement de produits intelligents et défendent le déploiement du MBSE. Cependant, pour des raisons présentées dans leur article,

l'usage du MBSE est nuancé. La modélisation système est également abordée à travers IDEF0, UML et SysML, ainsi que la modélisation dynamique avec Modelica ou Matlab/Simulink. Ainsi, la modélisation système au niveau outil soutient le MBSE au niveau méthode qui, à son tour, soutient le cycle en V au niveau processus, opérationnalisant l'IS au niveau approche et composant ainsi un **ensemble**. Toutefois, comme il s'agit d'un modèle de développement prescriptif, Tomiyama *et al.* (2019) nuancent l'utilisation du cycle en V qui peut s'avérer être inadéquate. Les auteurs énumèrent également de nombreux concepts et techniques qui peuvent être utilisés pour le développement de produits intelligents, mais qui peuvent aussi se révéler inadaptés dans certains cas. Certains d'entre eux sont les « méthodes » Agile, la conception modulaire, le développement de produits Lean (LPD), le DfX, la modélisation fonctionnelle, la modélisation comportementale, la conception d'architecture produit – *product architecture design* –, AMDE – *FMEA* dans la cartographie –, QFD, ou encore Kano ; ces auteurs défendent également la nécessité d'une conception pour la résilience (Tomiyama *et al.*, 2019).

Toujours au niveau approche, Anderl, Picard et Albrecht (2013) proposent d'utiliser le « Smart Engineering » qui repose sur une extension de l'IS. Cela est justifié par le fait que la connectivité et la communication élargissent les frontières des systèmes (Anderl, Picard et Albrecht, 2013). Les auteurs soulignent également que le cycle en V n'est pas adapté au développement de produits intelligents : « approaches like the V-model do not provide systematic approaches to develop Smart Products' communication ». Les auteurs semblent ainsi considérer que l'association de l'IS avec le cycle en V ne permet pas de gérer la partie connectivité et communication des produits intelligents. Le cadre qu'ils proposent s'appuie sur des travaux antérieurs et sur une évolution d'un cycle en V, le cycle en W (Nattermann et Anderl, 2010), introduit pour les systèmes adaptroniques. En conséquence, leurs travaux semblent proposer une combinaison d'approche et de processus élargis pour s'adapter aux caractéristiques des produits intelligents, notamment la communication.

Rauch *et al.* proposent quant à eux de s'appuyer sur une extension du développement de produits Lean – *Lean Product Development* (LPD) – soutenu par les technologies, concepts et

solutions de l'Industrie 4.0. En s'appuyant sur l'application de la conception axiomatique (Suh, 1998), les auteurs déterminent les paramètres du Lean Design qui sont mis en correspondance avec les technologies et concepts de l'Industrie 4.0. Ainsi, les exigences fonctionnelles (FRs) sont sept types de gaspillages du Lean, qui sont décomposés en paramètres de conception (DPs), eux-mêmes associés aux technologies et concepts de l'Industrie 4.0. Il en résulte des lignes directrices visant à fournir un « Lean and Smart Product Development » pour le développement de produits intelligents (Rauch, Dallasega et Matt, 2016). Nunes, Pereira et Alves (2017) explorent également le développement de produits intelligents et la relation avec l'Industrie 4.0. De leur point de vue, l'Industrie 4.0 et les technologies associées favoriseront la mise en œuvre des principes Lean et le LPD, mais les auteurs ne recommandent pas explicitement de s'appuyer sur ce dernier.

Miranda *et al.* (2017) soulignent l'importance d'intégrer l'impact environnemental et la durabilité. Les chercheurs évoquent à ce titre l'usage de la conception pour l'environnement (DfE), l'éco-conception, la conception durable – *sustainable design* – et l'évaluation du cycle de vie (LCA). Par ailleurs, les auteurs ont conceptualisé le terme de « S³ products » pour « sensing, smart and sustainable products », comprendre les produits sensitifs, intelligents et durables. Sur la base de la littérature pour le développement de nouveaux produits – *new product development* (NPD) –, de leurs expériences antérieures et de l'*Integrated Product, Process and Manufacturing System Development Reference Model* (IPPM), les auteurs proposent un cadre de référence dénommé « S³ product development ». Il est à noter que le processus NPD peut être relié à l'Étape-jalon selon Cooper (2004) et est considéré ici comme une stratégie par Miranda *et al.* (2017). Le cadre proposé se veut holistique et intègre par conséquent le développement de produits, les processus de fabrication et le développement des systèmes de production. Ainsi, au sein de la cartographie, on retrouve la proposition des auteurs dénommée « S³ product development » qui apparaît comme une conjonction de l'IPPM et du NPD. Ces travaux sont représentés sur la Figure 5.11.

Par ailleurs, tel que souligné à la section 3.3, les auteurs proposent une boîte à outils qui rassemble des concepts et techniques plausibles pour accompagner chacune des étapes. Cependant, il est à noter que bon nombre des concepts et techniques cités dans leur article ne sont pas appuyés par une référence, ce qui a compliqué leur classement. Pour la phase d'idéation, les auteurs mentionnent les *megatrends analysis*, « A day in the life », les cartes d'empathie – *Empathy map* –, *Job-to-be-done framework*³⁵, *Outcome expectations*, *Matrix of needs and satisfiers*, KANO, la Procédure hiérarchique d'analyse – *Analytic hierarchy process* (AHP) –, *Pugh chart*, *Value proposition* et *Storyboard*. Pour la phase dite de « concept design and target specifications », les auteurs proposent de mobiliser différentes techniques : *Physical decomposition*, *Functional decomposition*, *sustainable indicator repository*, QFD, *Morphological matrix and structure*, TRIZ, LCA, AMDE. L'AHP et le *Pugh chart* sont également cités à nouveau. Pour la phase de *detailed design*, les auteurs mentionnent les outils informatiques, de même que des pratiques de type DfX qui sont ici précisées comme étant le DfM, DfA et DfE. L'AMDE et le LCA sont cités à nouveau. Pour la phase de prototypage, les auteurs s'appuient sur du prototypage rapide, des prototypes virtuels et des prototypes dits fonctionnels. Ces types de prototypages sont regroupés au sein des blocs « Virtual prototyping - 3D modelling techniques » et « Physical and 3D Prototyping ». L'AMDE est par ailleurs cité de nouveau pour cette phase (Miranda *et al.*, 2017).

Pour tirer parti de l'ère numérique, Kim, Sul et Choi (2018) proposent d'utiliser les *Web Data* afin de déterminer les exigences des utilisateurs qui servent d'entrée à leur processus pour le développement de produits intelligents. Le processus proposé est itératif et s'appuie sur la QFD, la modélisation et la simulation appuyées par l'analyse par éléments finis, et enfin sur un prototype physique réalisé en prototypage rapide (Kim, Sul et Choi, 2018). Les auteurs intègrent également une orientation centrée sur l'utilisateur à travers le recours aux *storytelling* et au développement de l'expérience utilisateur – *user experience development*. Le processus

³⁵ Bien que qualifié de *framework*, ce dernier semble se rapprocher d'un outil, pour une tâche circonscrite qui serait de générer des solutions pour répondre à des difficultés/souhaits des utilisateurs.

proposé est un processus en trois étapes comportant des boucles d'itération qui vise à soutenir le développement de produits personnalisés par l'utilisateur. Il est appelé « Smart product design-finite element analysis process (SPD-FEAP) » et est représenté sur la Figure-A V-1. Toujours en lien avec l'exploitation des données, les produits intelligents offrent de nouvelles possibilités à travers leurs capacités de collecte de données et d'échange de données grâce à la connectivité. Ainsi, les données d'utilisation collectées par lesdits produits peuvent être réutilisées pour le développement de produits (Tomiyama *et al.*, 2019). Ces données peuvent être stockées et gérées grâce à l'utilisation d'un jumeau numérique (Tomiyama *et al.*, 2019). Allant dans ce sens, Zheng, Xu et Chen (2018) proposent de s'appuyer sur une conception basée sur les données – *data-driven design* – pour le co-développement de produits intelligents. Ces données englobent « les données générées par l'utilisateur » et « les données contribuant à la valeur du produit » (Zheng, Xu et Chen, 2020). Quant au co-développement, il consiste en un développement collaboratif avec l'implication des parties prenantes, telles que les fabricants, les partenaires et les clients, afin de générer de nouvelles idées et d'adapter le produit intelligent aux besoins des clients (Zheng, Xu et Chen, 2020). Les travaux proposés visent à mettre en œuvre le concept de personnalisation et d'adaptation des produits intelligents, tant sur les aspects matériels que logiciels tout au long du cycle de vie. Ainsi, le processus de conception repose lui-même sur deux étapes. La première est une étape de conception modulaire – *modular design* – pour le niveau macro et qui s'appuie sur la modélisation fonctionnelle. La seconde étape porte sur le niveau micro et est dénommée *scalable design*. Selon notre compréhension, la conception modulaire permet de soutenir le co-développement. Néanmoins, le co-développement utilisé par les auteurs souffre de l'absence d'une description détaillée et formelle. D'après notre lecture, il semble plus proche d'une pratique d'ingénierie que d'un modèle de processus complet qui permet de gérer l'intégralité du développement de produit. C'est pourquoi le co-développement est classé comme une méthode. La modularité des produits intelligents est également étudiée par Li, Roy et Saltz (2017). Les auteurs ont une démarche similaire en combinant également une conception basée sur les modules (interprétée comme étant la conception modulaire) et *scale-based* (interprétée comme se référant au *scalable design*). Enfin, ces auteurs prennent en considération la modularité du matériel et de

la partie logicielle, et s'accordent sur la nature évolutive des produits intelligents (Li, Roy et Saltz, 2017).

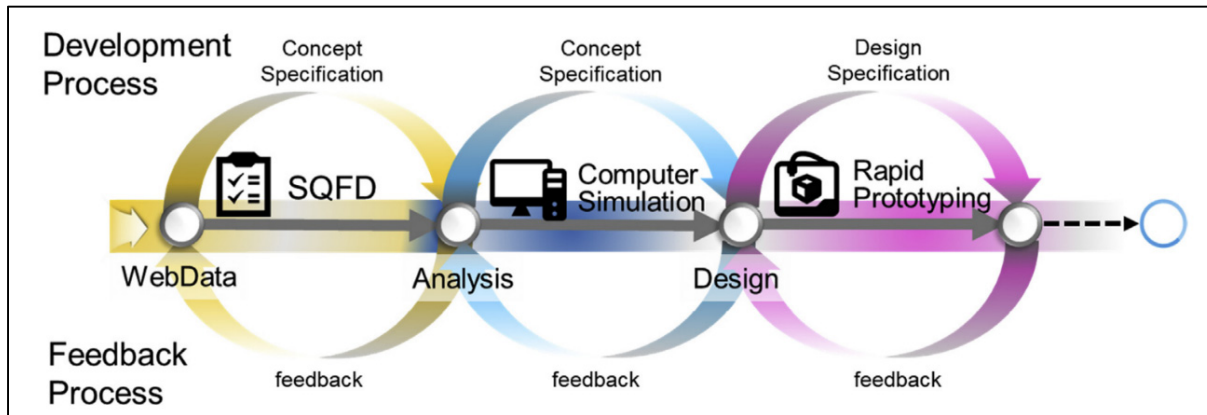


Figure-A V-1 Illustration du Smart product design-finite element analysis process
Tirée de Kim, Sul et Choi (2018)

D'une manière similaire aux SCP, l'ère du numérique et de la connectivité ubiquitaire soulève également des questions de sécurité fonctionnelle et de cybersécurité pour les produits intelligents. En ce sens, la conception axiomatique et le *signal flow analysis* (SFA) peuvent être déployées (Riel *et al.*, 2018). À travers un exemple du secteur automobile, les auteurs discutent du cycle en V, mais leur relation avec la conception axiomatique et le SFA n'est pas explicitée (Riel *et al.*, 2018). Selon notre compréhension, les auteurs utilisent un sous-ensemble de la conception axiomatique, positionnant dans ce cas la conception axiomatique au niveau méthode – indiqué comme un usage dérivé de la conception Axiomatique. Enfin, le SFA est lié aux graphes des flux de signaux – *signal flow graph* –, issus du génie électrique (Abrahams et Coverley, 1965). En conséquence, le SFA est considéré comme un outil.

Du point de vue de l'ingénierie électronique, Crepaldi *et al.* (2014) utilisent une « top-down constraint-driven methodology ». Cette « méthodologie » est basée sur le concept de contrainte qui est expliqué plus en détail dans Jerke, Lienig et Freuer (2011). La « méthodologie » proposée s'appuie sur différentes tâches que sont « la gestion et la propagation des contraintes,

la dérivation, la transformation et la vérification » (Crepaldi *et al.*, 2014). De notre point de vue, la « constraint-driven methodology » est une méthode, car elle traduit des exigences de haut niveau en contraintes, et peut s'inscrire dans un processus de développement plus large.

Comme pour les produits mécatroniques, à des fins d'exploration de l'espace des solutions, les graphes de liaison sont utilisés pour modéliser les systèmes. Dagli *et al.* (2010) ont proposé de s'appuyer sur les graphes de liaison, qui peuvent être réalisés en SysML. Le SysML, en tant que langage de modélisation orientée objet, est utilisé pour représenter des architectures intégrant la définition des interfaces. Ces architectures peuvent par la suite être optimisées. Par ailleurs, les auteurs proposent un *interface-based architecture development process* qui affine les exigences en architectures fonctionnelle, système puis physique. Néanmoins, nous comprenons que le *interface-based architecture development process* ne couvre pas l'intégralité du processus de développement, du fait que ce dernier s'arrête après l'architecture physique. Par conséquent, et sur la base de notre arbre de décision, il tend à se rapprocher de la définition d'une méthode.

Enfin, en plus des produits intelligents que nous pourrions qualifier de « génériques » au sens large, le développement de produits intelligents spécifiques est également abordé par la littérature. Par exemple, les produits intelligents dédiés à la santé. Pour le développement des produits intelligents spécifiques, Rahimi et Ibarra (2014) insistent sur l'implication du client et justifient le recours à la conception centrée sur l'utilisateur. En lien avec l'interaction avec l'utilisateur et les techniques de conception centrée sur l'utilisateur, Säde vise à soutenir le développement de « usable and desirable smart products » (Säde, 1999). Pour ce faire, l'auteur s'appuie sur la modélisation et le prototypage à travers sept représentations possibles qui permettent d'évaluer les aspects matériels et logiciels du « product usability ». Ces sept outils sont représentés graphiquement par les blocs « prototyping - 3D modelling techniques » et « Physical and 3D Prototyping ». Les représentations visent à décrire « the emerging product, its user interface, and the interaction between the user and the product ».

Cette annexe a permis de présenter la variété des concepts et des techniques proposés par la littérature scientifique pour soutenir le développement de produits intelligents. Sur la base de ces concepts et techniques, une cartographie a été établie et est présentée à la section 5.4.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aarts, E. 2004. « Ambient intelligence: a multimedia perspective ». *IEEE Multimedia*, vol. 11, n° 1, p. 12-19. <<https://doi.org/10.1109/MMUL.2004.1261101>>.
- Aarts, E. et J. Encarnação. 2006. « Into Ambient Intelligence ». *True Visions*, Aarts, E. et J. Encarnação, p. 1-6. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. <<https://doi.org/10.1007/978-3-540-28974-6>>.
- Abrahams, J.R. et G. P. Coverley. 1965. *Signal flow analysis*. Pergamon Press.
- Abrahamsson, P., J. Warsta, M.T. Siponen et J. Ronkainen. 2003. « New directions on agile methods: a comparative analysis ». *25th International Conference on Software Engineering, 2003. Proceedings*. p. 244-254. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/ICSE.2003.1201204>>.
- Abramovici, M. 2015. « Smart Products ». *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, p. 1-5. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16785-1>.
- Abramovici, M. et F. Bellalouna. 2007. « Integration and Complexity Management within the Mechatronics Product Development ». *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, p. 113-118. London : Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-935-4_20>.
- Adams, K. M. 2015. *Non-functional Requirements in Systems Analysis and Design*. Coll. « Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality ». Cham : Springer International Publishing. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-18344-2>>.
- AFNOR. 2008. *NF E01-010 Mécatronique - Vocabulaire*. AFNOR
- Ahram, T., W. Karwowski et B. Amaba. 2011. « Collaborative systems engineering and social-networking approach to design and modelling of smarter products ». *Behaviour and Information Technology*, vol. 30, n° 1, p. 13-26. <<https://doi.org/10.1080/0144929X.2010.490957>>.
- Ahrens, M., C. Richter, P. Hehenberger et G. Reinhart. 2018. « Novel approach to establish model-based development and virtual commissioning in practice ». *Engineering with Computers*, vol. 35, p. 741-754. <<https://doi.org/10.1007/s00366-018-0622-6>>.
- El Aissaoui, A. 2015. *La Moissonneuse Batteuse : Principe de fonctionnement et innovations technologiques*. Fiche Technique du Centre de Développement Agricole (CECAMA).

- Akkaya, I., P. Derler, S. Emoto et E. A. Lee. 2016. « Systems Engineering for Industrial Cyber-Physical Systems Using Aspects ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, n° 5, p. 997-1012. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2512265>>.
- Al-Fuqaha, A., M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari et M. Ayyash. 2015. « Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications ». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, n° 4, p. 2347-2376. <<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>>.
- Albers, A., N. Burkardt, M. Meboldt et M. Saak. 2005. « Spalten problem solving methodology in the product development ». *Proceedings ICED05, the 15th International Conference on Engineering Design*, vol. DS 35.
- Albers, A., N. Reiß, N. Bursac, J. Urbanec et R. Lüdcke. 2014. « Situation-appropriate method selection in product development process - empirical study of method application ». *Proceedings of NordDesign 2014 Conference*, p. 550-559.
- Allaoui, S., M. Bourgault et R. Pellerin. 2019. « Business transformation frameworks: Comparison and industrial adaptation ». *Journal of Enterprise Transformation*, p. 1-28. <<https://doi.org/10.1080/19488289.2019.1571538>>.
- Alur, R. 2015. *Principles of Cyber-physical Systems*. MIT Press.
- Alvarez Cabrera, A. A., M. J. Foeken, O. A. Tekin, K. Woestenenk, M. S. Erden, B. De Schutter, M. J.L. Van Tooren, R. Babuška, F. J.A.M. Van Houten et T. Tomiyama. 2010. « Towards automation of control software: A review of challenges in mechatronic design ». *Mechatronics*, vol. 20, n° 8, p. 876-886. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.05.003>>.
- Alvarez Cabrera, A. A., K. Woestenenk et T. Tomiyama. 2011. « An architecture model to support cooperative design for mechatronic products: A control design case ». *Mechatronics*, vol. 21, n°3, p. 534-547. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.01.009>>.
- Amuthakkannan, R. 2012. « Parameters design and performance analysis of a software-based mechatronics system using Taguchi robust design - a case study ». *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 10, n° 1, p. 1- 24. <<https://doi.org/10.1504/ijpqm.2012.047939>>.
- Anacker, H., R. Dumitrescu, J. Gausemeier et C. Y. Low. 2013. « Identification of Reusable Controller Strategies for the System Design of Advanced Mechatronic Systems ». *Applied Mechanics and Materials*, vol. 393, p. 579-585. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.393.579>>.

- Anderl, R. 2014. « Industrie 4.0 - Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production ». *19th International Seminar on High Technology*, p. 1-14.
<<https://doi.org/10.13140/2.1.1039.4406>>.
- Anderl, R., A. Picard et K. Albrecht. 2013. *Smart Product Engineering*. Coll. « Lecture Notes in Production Engineering ». Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.
<<https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8>>.
- Andreasen, M.M. et L. Hein. 1987. *Integrated product development*. IFS-Springer Verlag.
- Araujo Jr., C. S. 2001. « Acquisition of Product Development Tools in Industry : A Theoretical Contribution ». Lyngby, Denmark, Technical University of Denmark.
- Araz, M. et Z. Erden. 2014. « Behavioural representation and simulation of design concepts for systematic conceptual design of mechatronic systems using Petri Nets ». *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 2, p. 563-583.
<<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.838648>>.
- Association Française de Mécanique. 2015. *Livre Blanc de la Recherche en Mécanique : Enjeux industriels et sociétaux Recherche, innovation, formation*. EDP Sciences.
<<https://doi.org/10.1051/978-2-7598-1683-5>>.
- Attarzadeh-Niaki, S. H. et I. Sander. 2016. « An extensible modeling methodology for embedded and cyber-physical system design ». *Simulation*, vol. 92, n° 8, p. 771-794.
<<https://doi.org/10.1177/0037549716659753>>.
- Atzori, L., A. Iera et G. Morabito. 2010. « The Internet of Things: A survey ». *Computer Networks*, vol. 54, n° 15, p. 2787-2805. <<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>>.
- Bachmann, V. et R. Messnarz. 2012. « Improving the software development for multiple projects by applying a platform strategy for mechatronic systems ». *Journal of Software: Evolution and Process*, vol. 24, n° 5, p. 541-549. <<https://doi.org/10.1002/smr.495>>.
- Baheti, R. et H. Gill. 2011. « Cyber-physical Systems ». *The Impact of Control Technology*, n° 1, p. 161-166. <<https://doi.org/10.1145/1795194.1795205>>.
- Balasubramaniyan, S., S. Srinivasan, F. Buonopane, B. Subathra, J. Vain et S. Ramaswamy. 2016. « Design and verification of Cyber-Physical Systems using TrueTime, evolutionary optimization and UPPAAL ». *Microprocessors and Microsystems*, vol. 42, p. 37-48.
<<https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.12.006>>.
- Bao, M. et W. Wang. 1996. « Future of microelectromechanical systems (MEMS) ». *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 56, n° 1, p. 135-141.
<[https://doi.org/10.1016/0924-6460\(96\)01274-5](https://doi.org/10.1016/0924-6460(96)01274-5)>.

- Barbieri, G., P. Derler, D. M. Auslander, R. Borsari et C. Fantuzzi. 2016. « Design of mechatronic systems through aspect and object-oriented modeling ». *Automatisierungstechnik*, vol. 64, n° 3, p. 244-252. <<https://doi.org/10.1515/auto-2015-0071>>.
- Barbieri, G., C. Fantuzzi et R. Borsari. 2014. « A model-based design methodology for the development of mechatronic systems ». *Mechatronics*, vol. 24, n° 7, p. 833-843. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.12.004>>.
- Baumeister, H., A. Knapp et M. Wirsing. 2004. « Property-driven development ». *Proceedings of the Second International Conference on Software Engineering and Formal Methods. SEFM 2004*, p. 96-102. <<https://doi.org/10.1109/SEFM.2004.1347507>>.
- Beck, K., M. Beedle, A. Van Bennekum, A. Cockburn, W. Cunningham, M. Fowler, J. Grenning, J. Highsmith, A. Hunt, R. Jeffries, J. Kern, B. Marick, R. C. Martin, S. Mellor, K. Schwaber, J. Sutherland et D. Thomas. 2001. « Agile Manifesto ». *Software Development*. <<http://agilemanifesto.org/iso/fr/principles.html>>. Consulté le 28 juin 2016.
- Van Beek, T. J., M. S. Erden et T. Tomiyama. 2010. « Modular design of mechatronic systems with function modeling ». *Mechatronics*, vol. 20, n° 8, p. 850-863. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.02.002>>.
- Behbahani, S. et C. W. De Silva. 2007. « Reliability tradeoffs of a complex mechatronic system in the early design stage ». *International Journal of Manufacturing Research*, vol. 2, n° 1, p. 51. <<https://doi.org/10.1504/ijmr.2007.013426>>.
- Benveniste, A., B. Caillaud, D. Nickovic, R. Passerone, J. Raclet, P. Reinkemeier, A. Sangiovanni-vincentelli, W. Damm, T. Henzinger et K. Guldstrand Larsen. 2015. *Contracts for Systems Design : Theory*. Rapport de recherche N°8759, Inria.
- Bertschi, S., S. Bresciani, T. Crawford, R. Goebel, W. Kienreich, M. Lindner, V. Sabol et A. Vande Moere. 2013. « What Is Knowledge Visualization? Eight Reflections on an Evolving Discipline ». *Knowledge Visualization Currents*, Marchese, F. T. et E. Banissi, p. 13-32. London : Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4303-1_2>.
- Birkhofer, H., H. Klobardanz, B. Berger et T. Sauer. 2002. « Cleaning up Design Methods - Describing Methods Completely and Standardised ». *Proceedings of DESIGN2002, the 7th International Design Conference*, vol. 30, p. 17-22.
- Bishop, R. H. 2002. *The Mechatronics Handbook*. CRC Press.
- Blanchard, B. S. et W. Fabrycky. 1990. *Systems Engineering and Analysis*, 4th éd. Prentice Hall.

- Blessing, L. T.M. 1994. « A process-based approach to computer supported engineering design ». Universiteit Twente.
- Blessing, L. T.M. et A. Chakrabarti. 2009. *DRM, a Design Research Methodology*. Springer London. <<https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>>.
- Bloem, J., M. van Doorn, S. Duivestein, D. Excoffier, R. Maas et E. van Ommeren. 2014. *The Fourth Industrial Revolution Things to Tighten the Link Between IT and OT*. Rapport Sogeti VINT.
- Boehm, B. W. 1988. « A spiral model of software development and enhancement ». *Computer*, vol. 21, n° 5, p. 61-72. <<https://doi.org/10.1109/2.59>>.
- Böhmer, A. I. 2018. « When digital meets physical – Agile Innovation of Mechatronic Systems ». Technische Universität München.
- Bradley, D. A. et D. Dawson. 1991. « Information based strategies in the design of mechatronic systems ». *Design Studies*, vol. 12, n° 1, p. 12-18. <[https://doi.org/10.1016/0142-694X\(91\)90004-G](https://doi.org/10.1016/0142-694X(91)90004-G)>.
- Bradley, D., D. Russell, I. Ferguson, J. Isaacs, A. MacLeod et R. White. 2015. « The Internet of Things – The future or the end of mechatronics ». *Mechatronics*, vol. 27, p. 57-74. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.02.005>>.
- Brandmeier, M., E. Bogner, M. Brossog et J. Franke. 2016. « Product Design Improvement Through Knowledge Feedback of Cyber-physical Systems ». *Procedia CIRP*, vol. 50, p. 186-191. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.026>>.
- Braun, T. et U. Lindemann. 2003. « Supporting the selection, adaptation and application of methods in product development ». *International Conference on Engineering Design ICED 03 Stockholm*.
- Breitbach, E. J., C. Anhalt et H. P. Monner. 2001. « Overview of adaptronics in aeronautical applications ». *Air & Space Europe*, vol. 3, n° 3-4, p. 148-151. <[https://doi.org/10.1016/s1290-0958\(01\)90079-6](https://doi.org/10.1016/s1290-0958(01)90079-6)>.
- Bricogne, M. 2015. « Méthode Agile pour la conception collaborative multidisciplinaire de systèmes intégrés : application à la Mécatronique ». Université de Technologie de Compiègne.
- Bricogne, M., J. Le Duigou et B. Eynard. 2016. « Design Processes of Mechatronic Systems ». *Mechatronic Futures*, Bradley, D. et P. Hehenberger, p. 75-89. Cham : Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_6>.

- Brinkkemper, S. 1996. « Method engineering: engineering of information systems development methods and tools ». *Information and Software Technology*, vol. 38, n° 4, p. 275-280. <[https://doi.org/10.1016/0950-5849\(95\)01059-9](https://doi.org/10.1016/0950-5849(95)01059-9)>.
- Broom, A. 2005. « Using qualitative interviews in CAM research: A guide to study design, data collection and data analysis ». *Complementary Therapies in Medicine*, vol. 13, n° 1, p. 65-73. <<https://doi.org/10.1016/j.ctim.2005.01.001>>.
- Broy, M. et A. Schmidt. 2014. « Challenges in Engineering Cyber-Physical Systems ». *Computer*, vol. 47, n° 2, p. 70-72. <<https://doi.org/10.1109/MC.2014.30>>.
- Brunetti, G. et B. Golob. 2000. « Feature-based approach towards an integrated product model including conceptual design information ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 32, n° 14, p. 877-887. <[https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00076-2)>.
- Buchert, T., F. A. Halstenberg, J. Bonvoisin, K. Lindow et R. Stark. 2017. « Target-driven selection and scheduling of methods for sustainable product development ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 161, p. 403-421. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.067>>.
- Bures, T., V. Matena, R. Mirandola, L. Pagliari et C. Trubiani. 2018. « Performance Modelling of Smart Cyber-Physical Systems ». *Companion of the 2018 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering - ICPE '18*. p. 37-40. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/3185768.3186306>>.
- Burmester, S., H. Giese et M. Tichy. 2005. « Model-Driven Development of Reconfigurable Mechatronic Systems with Mechatronic UML ». *Model Driven Architecture*, Aßmann U., Aksit M., Rensink A., vol. 3599, p. 47- 61. <http://dx.doi.org/10.1007/11538097_4>.
- Buur, J. et M. M. Andreasen. 1989. « Design models in mechatronic product development ». *Design Studies*, vol. 10, n° 3, p. 155-162. <[https://doi.org/10.1016/0142-694X\(89\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0142-694X(89)90033-1)>.
- Cáceres, R. et A. Friday. 2012. « Ubicomp systems at 20: Progress, opportunities, and challenges ». *IEEE Pervasive Computing*, vol. 11, n° 1, p. 14-21. <<https://doi.org/10.1109/MPRV.2011.85>>.
- Cagan, J. et M. C. Vogel. 2002. *Creating Breakthrough Products*. Financial Times Press.
- Caillaud, E., B. Rose et V. Goepp. 2016. « Research methodology for systems engineering: some recommendations. » *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 12, p. 1567-1572. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.803>>.

- Cao, Y., Y. Liu et C. J.J. Paredis. 2011. « System-level model integration of design and simulation for mechatronic systems based on SysML ». *Mechatronics*, vol. 21, n° 6, p. 1063-1075. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.05.003>>.
- Carni, D. L., D. Grimaldi, F. Lamonaca, L. Nigro et P. F. Sciammarella. 2017. « From distributed measurement systems to cyber-physical systems: A design approach ». *International Journal of Computing*, vol. 16, n° 2, p. 66-73. <<https://doi.org/10.1109/I2MTC.2017.7969977>>.
- Chai, K. H. et Y. Xin. 2006. « The application of new product development tools in industry: The case of Singapore ». *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 53, n° 4, p. 543-554. <<https://doi.org/10.1109/tem.2006.883708>>.
- Chami, M. et J.M. Bruel. 2015. « Towards an integrated conceptual design evaluation of mechatronic systems: The SysDICE approach ». *Procedia Computer Science*, vol. 51, n° 1, p. 650-659. <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.180>>.
- Chan, L. W. et T. P. Leung. 1996. « Spiral design model for consumer mechatronic products ». *Mechatronics*, vol. 6, n° 1, p. 35-51. <[https://doi.org/10.1016/0957-4158\(95\)00041-0](https://doi.org/10.1016/0957-4158(95)00041-0)>.
- Chen, C. Y., I. M. Chen et C. C. Cheng. 2009. « Integrated design of legged mechatronic system ». *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 4, n° 3, p. 264-275. <<https://doi.org/10.1007/s11465-009-0060-7>>.
- Chen, F., H. Ye, J. Yang, Y. Huang, J. Zhang, X. Qi, C. Zhao, J. Zhu et W. Zhou. 2015. « A standardized design methodology for complex digital logic components of cyber-physical systems ». *Microprocessors and Microsystems*, vol. 39, n° 8, p. 1245-1254. <<https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.08.012>>.
- Chen, R., Y. Liu, J. Zhao et X. Ye. 2019. « Model verification for system design of complex mechatronic products ». *Systems Engineering*, vol. 22, n° 2, p. 156-171. <<https://doi.org/10.1002/sys.21470>>.
- Cheng, L., T. Yu, H. Jiang, S. Shi, Z. Tan et Z. Zhang. 2019. « Energy Internet Access Equipment Integrating Cyber-Physical Systems: Concepts, Key Technologies, System Development, and Application Prospects ». *IEEE Access*, vol. 7, p. 23127-23148. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897712>>.
- Cheval, K. 2015. « Étude et réalisation de circuits imprimés sur substrats polymères 3D (MID 3D) par microtamponnage ». Université Claude Bernard - Lyon I.
- Choi, S., G. Kang, C. Jun, J. Y. Lee et S. Han. 2017. « Cyber-physical systems: A case study of development for manufacturing industry ». *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 55, n° 4, p. 289-297. <<https://doi.org/10.1504/IJCAT.2017.086018>>.

- Cilliers, P. 1998. *Complexity and postmodernism*. Routledge.
- Clarkson, J. et C. Eckert. 2005. *Design process improvement*. Springer London. <<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-061-0>>.
- Claverie, B. 2010. « Pluri-, inter-, transdisciplinarité : ou le réel décomposé en réseaux de savoir ». *Projectics / Proy ctica / Projectique*, vol. 4, n  1, p. 5. <<https://doi.org/10.3917/proj.004.0005>>.
- Colombo, S., T. Djajadiningrat et L. Rampino. 2009. « Tangible, Smart and Dynamic Objects How the New Aesthetics Affects Meaning and Experience Origins ». *Design and semantics of form and movement - DeSForM 2015*. p. 12-27.
- Cook, D. J., J. C. Augusto et V. R. Jakkula. 2009. « Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities ». *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, n  4, p. 277-298. <<https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2009.04.001>>.
- Cooper, R. G. 2004. « New Products—What Separates the Winners from the Losers and What Drives Success ». *The PDMA Handbook of New Product Development*, K., Kenneth B., G. Castellion et A. Griffin, p. 3-28. John Wiley & Sons, Inc. <<https://doi.org/http://doi.wiley.com/10.1002/9780470172483>>.
- Cooper, R. G. et A. F. Sommer. 2016. « The Agile-Stage-Gate Hybrid Model: A Promising New Approach and a New Research Opportunity ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 33, n  5, p. 513-526. <<https://doi.org/10.1111/jpim.12314>>.
- Counsell, J., I. Porter, D. Dawson et M. Duffy. 2002. « Schemebuilder: computer aided knowledge based design of mechatronic systems ». *Assembly Automation*, vol. 19, n  2, p. 129-138. <<https://doi.org/10.1108/01445159910265206>>.
- Couturier, P., M. L , A. Imoussaten, V. Chapurlat et J. Montmain. 2014. « Tracking the consequences of design decisions in mechatronic Systems Engineering ». *Mechatronics*, vol. 24, n  7, p. 763-774. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.03.004>>.
- Craig, K. C. et F. R. Stolfi. 1994. *Introduction to Mechatronic System Design with Applications: Course Book*. IEEE.
- Crepaldi, M., M. Grosso, A. Sassone, S. Gallinaro, S. Rinaudo, M. Poncino, E. MacLi et D. Demarchi. 2014. « A top-down constraint-driven methodology for smart system design ». *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 14, n  1, p. 37-57. <<https://doi.org/10.1109/MCAS.2013.2296415>>.
- Crnkovic, I., U. Asklund et A. P. Dahlqvist. 2003. *Implementing and Integrating Product Data Management and Software Configuration Management*. Artech House.

- Crnkovic, I., I. Malavolta, H. Muccini et M. Sharaf. 2016. « On the Use of Component-Based Principles and Practices for Architecting Cyber-Physical Systems ». *Proceedings - 2016 19th International ACM SIGSOFT Symposium on Component-Based Software Engineering, CBSE 2016*, p. 23-32. <<https://doi.org/10.1109/CBSE.2016.9>>.
- Cronin, M. J. 2010. *Smart Products, Smarter Services*. Cambridge University Press. <<https://doi.org/10.1017/CBO9780511761928>>.
- Cross, N. 1993. « Science and design methodology: A review ». *Research in Engineering Design*, vol. 5, n° 2, p. 63-69. <<https://doi.org/10.1007/BF02032575>>.
- Cross, N. 2005. *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*, 3rd éd. John Wiley & Sons, Ltd.
- Dagli, C.H., A. Singh, J. P. Dauby et R. Wang. 2010. « Smart Systems Architecting: Computational Intelligence Applied To Trade Space Exploration and System Design ». *Systems Research Forum*, vol. 03, n° 02, p. 101-119. <<https://doi.org/10.1142/s1793966609000109>>.
- Danilovic, M. et T. R. Browning. 2007. « Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices ». *International Journal of Project Management*, vol. 25, n° 3, p. 300-314. <<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2006.11.003>>.
- Danjou, C., L. Rivest et R. Pellerin. 2017a. *Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité*. CEFRIO
- Danjou, C., L. Rivest et R. Pellerin. 2017b. « Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie. ». *CIGI 2017, 12^{ème} Congrès International de Génie Industriel*.
- Darwish, A. et A. E. Hassanien. 2018. « Cyber physical systems design, methodology, and integration: the current status and future outlook ». *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 9, n° 5, p. 1541-1556. <<https://doi.org/10.1007/s12652-017-0575-4>>.
- Dauphin-Tanguy, G., H. Arioui, R. Merzouki et H. A. Abbassi. 2008. « Integrated design of mechatronic systems ». *AIP Conference Proceedings*. p. 574-574. <<https://doi.org/10.1063/1.2953049>>.
- Davare, A., D. Densmore, L. Guo, R. Passerone, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, A. Simalatsar et Q. Zhu. 2013. « metro II: A Design Environment for Cyber-Physical Systems ». *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 12, n° 1s, p. 1 -31. <<https://doi.org/10.1145/2435227.2435245>>.

- Davila, T. 2000. « An empirical study on the drivers of management control systems' design in new product development ». *Accounting, Organizations and Society*, vol. 25, n° 4-5, p. 383-409. <[https://doi.org/10.1016/S0361-3682\(99\)00034-3](https://doi.org/10.1016/S0361-3682(99)00034-3)>.
- Dawid, H., R. Decker, T. Hermann, H. Jahnke, W. Klat, R. König et C. Stummer. 2017. « Management science in the era of smart consumer products: challenges and research perspectives ». *Central European Journal of Operations Research*, vol. 25, n° 1, p. 203-230. <<https://doi.org/10.1007/s10100-016-0436-9>>.
- Delbecq, S., M. Budinger, I. Hazyuk, F. Sanchez et J. Piaton. 2017. « A framework for sizing embedded mechatronic systems during preliminary design ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, n° 1, p. 4354-4359. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.875>>.
- Delgado-Hernández, D. J., A. Benites-Thomas et E. M. Aspinwall. 2007. « New product development - Empirical studies in the UK ». *International Journal of Product Development*, vol. 4, n° 5, p. 413-441. <<https://doi.org/10.1504/IJPD.2007.013041>>.
- Derelöv, M., J. Detterfelt, M. Björkman et C. F. Mandenius. 2008. « Engineering design methodology for bio-mechatronic products ». *Biotechnology Progress*, vol. 24, n° 1, p. 232-244. <<https://doi.org/10.1021/bp0701822>>.
- Derler, P., E. A. Lee, M. Torngren et S. Tripakis. 2013. « Cyber-physical system design contracts ». *2013 ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, ICCPS 2013*, p. 109-118. <<https://doi.org/10.1109/ICCPS.2013.6604005>>.
- Dieterle, W. 2005. « Mechatronic systems: Automotive applications and modern design methodologies ». *Annual Reviews in Control*, vol. 29, n° 2, p. 273-277. <<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2005.05.002>>.
- van Dijk, C. G.C. 1995. « New insights in computer-aided conceptual design ». *Design Studies*, vol. 16, n° 1, p. 62-80. <[https://doi.org/10.1016/0142-694X\(95\)90647-X](https://doi.org/10.1016/0142-694X(95)90647-X)>.
- Dimitrov, V., V. Jagtap, J. Skorinko, S.Chernova, M. Gennert et T. Padir. 2015. « Human-centered design of a cyber-physical system for advanced response to Ebola (CARE) ». *Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, p. 6856-6859. <<https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319968>>.
- Dohr, A., R. Modre-Osprian, M. Drobics, D. Hayn et G. Schreier. 2010. « The internet of things for ambient assisted living ». *ITNG2010 - 7th International Conference on Information Technology: New Generations*, p. 804-809. <<https://doi.org/10.1109/ITNG.2010.104>>.
- Drath, R. et A. Horch. 2014. « Industrie 4.0: Hit or hype? » *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, n° 2, p. 56-58. <<https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2312079>>.

- Dresch, A., D. P. Lacerda et J. A. V. Antunes Jr. 2015. *Design Science Research*. Cham : Springer International Publishing. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07374-3>>.
- Le Duigou, J. 2010. « Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue. Application aux PME mécaniciennes. » École Centrale de Nantes.
- Dumitrache, I., I. S. Sacala, M. A. Moisescu et S. I. Caramihai. 2017. « A conceptual framework for modeling and design of Cyber-Physical Systems ». *Studies in Informatics and Control*, vol. 26, n° 3, p. 325-334. <<https://doi.org/10.24846/v26i3y201708>>.
- Dumitrescu, R., H. Anacker, F. Bauer et J. Gausemeier. 2012. « Computer Support for the Identification of Solution Patterns for the Conceptual Design of Advanced Mechatronic Systems ». *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Volume 3: Advanced Composite Materials and Processing; Robotics; Information Management and PLM; Design Engineering*. p. 665- 674. <<https://doi.org/10.1115/ESDA2012-82350>>.
- Dunkels, A. et J.P. Vasseur. 2008. *The Internet of Things : IP for Smart Objects*. IPSO Alliance White Paper.
- Dupuis, J. F., Z. Fan et E. Goodman. 2015. « Evolutionary design of discrete controllers for hybrid mechatronic systems ». *International Journal of Systems Science*, vol. 46, n° 2, p. 303-316. <<https://doi.org/10.1080/00207721.2013.783643>>.
- Van Durme, G., L. Beaulieu et M. Margni. 2016. « L'apport de l'économie circulaire au regard d'autres approches et outils ». *L'économie circulaire Une transition incontournable*, McDonald, M., D.Normandin et S. Sauvé, p. 150-160. Presses de l'Université de Montréal.
- Dussault, G. 1990. « Les déterminants de l'efficacité de la multidisciplinarité ». *Le Gérontophile*, vol. 12, n° 2, p. 3-6.
- Duvall, P. M., S. Matyas et A. Glover. 2007. *Continuous integration: improving software quality and reducing risk*. Addison-Wesley.
- Ebert, C. 2013. « Improving engineering efficiency with PLM/ALM ». *Software and Systems Modeling*, vol. 12, n° 3, p. 443-449. <<https://doi.org/10.1007/s10270-013-0347-3>>.
- Ebert, C. et M. Paasivaara. 2017. « Scaling Agile ». *IEEE Software*, vol. 34, n° 6, p. 98-103. <<https://doi.org/10.1109/MS.2017.4121226>>.
- Eckert, C. et J. Clarkson. 2005. « Introduction : The reality of design ». *Design process improvement*, Clarkson, J. et C. Eckert. Springer London.

- Ehrlenspiel, K. 2014. « Kostenverantwortung der Produktentwickler ». *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*, Ehrlenspiel, K., A. Kiewert, U. Lindemann et M. Mörtl, p. 7-20. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41959-1_2>.
- Electronic Industries Alliance - EIA. 1999. *ANSI/EIA-632-1998 : Processes for Engineering a System*. <[https://doi.org/10.1016/S0737-0806\(99\)80290-1](https://doi.org/10.1016/S0737-0806(99)80290-1)>.
- Erol, S., A. Schumacher et W. Sihn. 2016. « Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three-stage process model ». *COMA'16, International Conference on Competitive Manufacturing*, p. 495-501.
- Escobar, L., N. Carvajal, J. Naranjo, A. Ibarra, C. Villacis, M. Zambrano et F. Galarraga. 2017. « Design and implementation of complex systems using Mechatronics and Cyber-Physical Systems approaches ». *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2017*, p. 147-154. <<https://doi.org/10.1109/ICMA.2017.8015804>>.
- Estefan, J. A. 2008. *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*. INCOSE MBSE Initiative. <<https://doi.org/10.1109/35.295942>>.
- ExtremeProgramming.org. 2000. <<http://www.extremeprogramming.org/map/project.html>>. Consulté le 10 octobre 2021.
- Fan, H., Y. Liu, B. Hu et X. Ye. 2016. « Multidomain Model Integration for Online Collaborative System Design and Detailed Design of Complex Mechatronic Systems ». *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, n° 2, p. 709-728. <<https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2390039>>.
- Fan, T. et Y. Chen. 2010. « A scheme of data management in the Internet of Things ». *2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, p. 110-114. <<https://doi.org/10.1109/ICNIDC.2010.5657908>>.
- Fan, Z., J. Wang et E. Goodman. 2004. « Exploring open-Ended design space of mechatronic systems ». *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 1, n° 1, p. 295-302.
- Farid, A. M. et L. Ribeiro. 2015. « An Axiomatic Design of a Multiagent Reconfigurable Mechatronic System Architecture ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, n° 5, p. 1142-1155. <<https://doi.org/10.1109/TII.2015.2470528>>.
- Faure, P. et P. Darmayan. 2016. « Le plan français “Industrie du futur” ». *Réalités industrielles*. Novembre 2016, p. 57.
- Favi, C., M. Marconi, M. Germani et M. Mandolini. 2019. « A design for disassembly tool oriented to mechatronic product de-manufacturing and recycling ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 39, p. 62-79. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.008>>.

- Feldmüller, D. 2018. « Usage of agile practices in Mechatronics System Design Potentials, Challenges and Actual Surveys ». *Proceedings of the 2018 19th International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM 2018*, p. 30-35. <<https://doi.org/10.1109/REM.2018.8421803>>.
- Feng, Y., B. Hu, H. Hao, Y. Gao, Z. Li et J. Tan. 2018. « Design of Distributed Cyber-Physical Systems for Connected and Automated Vehicles with Implementing Methodologies ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, n° 9, p. 4200-4211. <<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2805910>>.
- Fitzgerald, J., C. Gamble, P. G. Larsen, K. Pierce et J. Woodcock. 2015. « Cyber-Physical Systems Design: Formal Foundations, Methods and Integrated Tool Chains ». *Proceedings - 3rd FME Workshop on Formal Methods in Software Engineering, Formalise 2015*, p. 40-46. <<https://doi.org/10.1109/FormaliSE.2015.14>>.
- Forsberg, K. et H. Mooz. 1991. « The Relationship of System Engineering to the Project Cycle ». *INCOSE International Symposium*, vol. 1, n° 1, p. 57-65. <<https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.1991.tb01484.x>>.
- Franke, S., R. Kirschner, A. Kain, I. Becker et U. Lindemann. 2009. « Managing early phases of innovation processes and the use of methods within empirical results from an industry survey ». *ICED09*, p. 193-204.
- Freddi, D. 2009. « The integration of old and new technological paradigms in low- and medium-tech sectors: The case of mechatronics ». *Research Policy*, vol. 38, n° 3, p. 548-558. <<https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.10.017>>.
- French, M. J. 1985. *Conceptual Design for Engineers*. Springer Berlin Heidelberg. <<https://doi.org/10.1007/978-3-662-11364-6>>.
- French, M. J. 1999. *Conceptual Design for Engineers*, 3rd éd. Springer Berlin Heidelberg. <<https://doi.org/10.1007/978-3-662-11364-6>>.
- Fricker, S. A. 2012. « Software Product Management ». *Software for People, Management for Professionals*, Maedche, A., A. Botzenhardt et L. Neer, p. 53-81. Coll. « Management for Professionals ». Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31371-4_4>.
- Fruchter, R., K.A. Reiner, G. Toye et L.J. Leifer. 1996. « Collaborative Mechatronic System Design ». *Concurrent Engineering*, vol. 4, n° 4, p. 401-412. <<https://doi.org/10.1177/1063293X9600400408>>.
- Fu, Y., W. Choosilp et Z. Dong. 2018. « Model-based Test-Driven Cyber-Physical System Design ». *SoutheastCon 2018*, p. 1-6. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/SECON.2018.8479080>>.

- Gamage, L. B., C. W. De Silva et R. Campos. 2011. « Design evolution of mechatronic systems through modeling, on-line monitoring, and evolutionary optimization ». *Mechatronics*, vol. 22, n° 1, p. 83-94. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.11.012>>.
- Ganzarain, J. et N. Errasti. 2016. « Three stage maturity model in SME's towards industry 4.0 ». *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 5, p. 1119-1128. <<https://doi.org/10.3926/jiem.2073>>.
- Gao, Z., H. Xia et G. Dai. 2011. « A model-based software development method for automotive cyber-physical systems ». *Computer Science and Information Systems*, vol. 8, n° 4, p. 1277-1301. <<https://doi.org/10.2298/csis110303059g>>.
- García-Valls, M., D. Perez-Palacin et R. Mirandola. 2018. « Pragmatic cyber physical systems design based on parametric models ». *Journal of Systems and Software*, vol. 144, p. 559-572. <<https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.06.044>>.
- Gausemeier, J., R. Dumitrescu, S. Kahl et D. Nordsiek. 2011. « Integrative development of product and production system for mechatronic products ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, n° 4, p. 772-778. <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.02.005>>.
- Geisberger, E., M. Broy. 2015. *Living in a networked world: Integrated research agenda Cyber-Physical Systems*. acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Gendron, S., J. Brousseau, A. Elouafi et B. Urli. 2011. « Development of a Tool for Assessing the Design Process: A step toward the creation of a Design Observatory ». *Proceedings of the 2nd Annual Canadian Engineering Education Association (CEEA) Conference*. <<https://doi.org/10.24908/pceea.v0i0.3626>>.
- Gericke, K. et L. Blessing. 2012. « An analysis of design process models across disciplines ». *Proceedings of International Design Conference, DESIGN2012*, vol. DS 70, p. 171-180.
- Gero, J. S. et U. Kannengiesser. 2004. « The situated function-behaviour-structure framework ». *Design Studies*, vol. 25, n° 4, p. 373-391. <<https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>>.
- Gidel, T. et W. Zonghero. 2006. *Management de projet: Approfondissements*. Lavoisier.
- Girard, P. et G. Doumeingts. 2004. « Modelling the engineering design system to improve performance ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 46, n° 1, p. 43-67. <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2003.09.008>>.
- Giusto, D., A. Iera, G. Morabito et L. Atzori. 2010. *The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications*. Springer New York. <<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1674-7>>.

- Goerzig, D. et T. Bauernhansl. 2018. « Enterprise Architectures for the Digital Transformation in Small and Medium-sized Enterprises ». *Procedia CIRP*, vol. 67, p. 540-545. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.257>>.
- Goevert, K., M. Brombeiss et U. Lindemann. 2019. « Integration of mechatronic product development methods in an agile development area ». *Research into Design for a Connected World. Smart Innovation, Systems and Technologies*, Chakrabarti A., vol 135. p.119- 131. Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-5977-4_10>.
- Goevert, K., J. Heimicke, U. Lindemann et A. Albers. 2019. « Interview study on the agile development of mechatronic systems ». *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED2019*, p. 2287-2296. <<https://doi.org/10.1017/dsi.2019.235>>.
- Goevert, K. et U. Lindemann. 2018. « Further development of an agile technique toolbox for mechatronic product development ». *Proceedings of International Design Conference, DESIGN2018*, p. 2015-2026. <<https://doi.org/10.21278/idc.2018.0204>>.
- Graessler, I. et J. Hentze. 2020. « The new V-Model of VDI 2206 and its validation ». *Automatisierungstechnik*, vol. 68, n° 5, p. 312-324. <<https://doi.org/10.1515/auto-2020-0015>>.
- Graja, I., S. Kallel, N. Guermouche, S. Cheikhrouhou et A. H. Kacem. 2018. « A comprehensive survey on modeling of cyber-physical systems ». *Concurrency Computation*, p. 1-18. <<https://doi.org/10.1002/cpe.4850>>.
- Grimheden, M. E. et E. Flening. 2019. « 50 years of mechatronics - What is next? ». *Proceedings of the 2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics, REM 2019*, vol. 5, p. 1-7. <<https://doi.org/10.1109/REM.2019.8744119>>.
- Guérineau, J., M. Bricogne, A. Durupt et L. Rivest. 2016. « Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology ». *Proceedings of the 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, p. 314-320. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2016.7547161>>.
- Guérineau, J., L. Rivest, M. Bricogne, A. Durupt et B. Eynard. 2018. « Towards a design-method selection framework for multidisciplinary product development ». *DESIGN2018*, p. 2879-2890.
- Guérineau, J., L. Rivest, M. Bricogne et A. Durupt. 2016. « Agile and Project-planned methods in multidisciplinary product design ». *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries. PLM 2016. 13th IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Harik R., L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard, A. Bouras. vol. 492, p. 108-118. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54660-5_11>.

- Gutierrez, A. et A. Serrano. 2008. « Assessing strategic, tactical and operational alignment factors for SMEs: Alignment across the organisation's value chain ». *International Journal of Value Chain Management*, vol. 2, n° 1, p. 33-56.
<<https://doi.org/10.1504/IJVCM.2008.016117>>.
- Habchi, G. et C. Barthod. 2016. « An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application ». *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 155, p. 236-254. <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.06.013>>.
- Habib, T. et H. Komoto. 2014. « Comparative analysis of design concepts of mechatronics systems with a CAD tool for system architecting ». *Mechatronics*, vol. 24, n° 7, p. 788-804. <<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2014.03.003>>.
- Hamza, G., M. Hammadi, M. Barkallah, J. Y. Choley, A. Riviere, J. Louati et M. Haddar. 2018. « Conceptual design decision support of a mechatronic system using analytical approach with Modelica ». *Mechanics & Industry*, vol. 19, n° 1.
<<https://doi.org/10.1051/meca/2018019>>.
- Harashima, F., M. Tomizuka et T. Fukuda. 1996. « Mechatronics - "What Is It, Why, and How?" An editorial ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, n° 1, p. 1-4.
<<https://doi.org/10.1109/TMECH.1996.7827930>>.
- Hasuo, I. 2017. « Metamathematics for Systems Design: Comprehensive Transfer of Formal Methods Techniques to Cyber-Physical Systems ». *New Generation Computing*, vol. 35, n° 3, p. 271-305. <<https://doi.org/10.1007/s00354-017-0023-1>>.
- Hehenberger, P. 2014. « Perspectives on hierarchical modeling in mechatronic design ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 188-197.
<<https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.06.005>>.
- Hehenberger, P., F. Poltschak, K. Zeman et W. Amrhein. 2010. « Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines ». *Mechatronics*, vol. 20, n° 8, p. 864-875.
<<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.003>>.
- Hehenberger, P. 2015. « An Approach to Model-based Parametric Design of Mechatronic Systems ». *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 12, n° 3, p. 282-289.
<<https://doi.org/10.1080/16864360.2014.981456>>.
- Hehenberger, P. et D. Bradley. 2016. *Mechatronic Futures*. Springer International Publishing.
<<https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1>>.

- Hehenberger, P., M. Bricogne, J. Le Duigou et B. Eynard. 2016. « Meta-Model of PLM for Design of Systems of Systems ». *Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things, PLM 2015*, Bouras A., B. Eynard, S. Foufou, K. D. Thoben, vol 467, p. 301-310. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9_28>.
- Hehenberger, P., T. J. Howard et J. Torry-Smith. 2016. « From Mechatronic Systems to Cyber-Physical Systems: Demands for a New Design Methodology? » *Mechatronic Futures*, Hehenberger P. et D. Bradley, p. 147-163. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_10>.
- Hehenberger, P., B. Vogel-Heuser, D. Bradley, B. Eynard, T. Tomiyama et S. Achiche. 2016. « Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications ». *Computers in Industry*, vol. 82, p. 273 -289. <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.006>>.
- Heinze, L. 2008. « Microsystems on their Way to Smart Systems ». *Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, NSTI-Nanotech, Nanotechnology 2008*. (2008), p. 186-189. CRC Press.
- Hermann, M., T. Pentek et B. Otto. 2016. « Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios ». *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, p. 3928-3937. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>>.
- Herzog, M. et B. Bender. 2017. « Competences for the development of smart products ». *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED17*, vol. 9, n° DS87, p. 285-294.
- Hevner, A. R., S. T. March, J. Park et S. Ram. 2004. « Design Science In IS Research ». *Management Information Systems*, vol. 28, n° 1, p. 75-105.
- Highsmith, J. 2002. « What Is agile software development? » *The Journal of Defense Software Engineering*, vol. 15, n° 10, p. 4-9.
- Den Hollander, M. 2015. « Organizational patterns for multidisciplinary development of a mechatronic system ». *Proceedings of the 20th European Conference on Pattern Languages of Programs - EuroPLoP '15*. (2015), p. 1-15. <<https://doi.org/10.1145/2855321.2855372>>.
- Hollauer, C., L. Becerril, N. Kattner, D. Weidmann, N. Chucholowski et U. Lindemann. 2017. « Adaptable mechatronic engineering design processes: Process reference model and methodology ». *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 65, p. 597-607. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3518-0_52>.

- Hollauer, C., N. Kattner et U. Lindemann. 2016. « Towards a methodology to support the development of flexible company-specific engineering design processes ». *2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, p. 2018-2030. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/PICMET.2016.7806724>>.
- Holler, M., M. Herterich, C. Dremel, F. Uebernickel et W. Brenner. 2018. « Towards a method compendium for the development of digitised products - Findings from a case study ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 11, n° 2, p. 131- 141. <<https://doi.org/10.1504/IJPLM.2018.092825>>.
- Hoppmann, J. 2009. « The Lean Innovation Roadmap – A Systematic Approach to Introducing Lean in Product Development Processes and Establishing a Learning Organization ». University of Braunschweig.
- Howard, T. J., S. J. Culley et E. Dekoninck. 2008. « Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature ». *Design Studies*, vol. 29, n° 2, p. 160-180. <<https://doi.org/10.1016/j.destud.2008.01.001>>.
- Hoxha, B., A. Dokhanchi et G. Fainekos. 2018. « Mining parametric temporal logic properties in model-based design for cyber-physical systems ». *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, vol. 20, n° 1, p. 79-93. <<https://doi.org/10.1007/s10009-017-0447-4>>.
- Hu, F., Y. Lu, A. V. Vasilakos, Q. Hao, R. Ma, Y. Patil, T. Zhang, J. Lu, X. Li et N. N. Xiong. 2016. « Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation ». *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, p. 449-475. <<https://doi.org/10.1016/j.future.2015.06.006>>.
- Hubka, V. 1982. *Principles of Engineering Design*. Elsevier. <<https://doi.org/10.1016/C2013-0-00858-4>>.
- Hubka, V. 1983. « Design tactics = methods + working principles for design engineers ». *Design Studies*, vol. 4, n° 3, p. 188-195. <[https://doi.org/10.1016/0142-694X\(83\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0142-694X(83)90029-7)>.
- Hubka, V. et W. E. Eder. 1988. *Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design*. <<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>>.
- Hughes, J. et G. Cybenko. 2014. « Three tenets for secure cyber-physical system design and assessment ». *Proc. SPIE 9097, Cyber Sensing 2014*, vol. 9097. <<https://doi.org/10.1117/12.2053933>>.
- Iansiti, M. et K. R. Lakhani. 2014. « Digital Ubiquity - How connections, sensors , and data, are revolutionizing business ». *Harvard business review*, November, p. 1-12.

- Ibarra, D., J. Ganzarain et J. I. Igartua. 2018. « Business model innovation through Industry 4.0: A review ». *Procedia Manufacturing*, vol. 22, p. 4-10. <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.002>>.
- INCOSE. 2015. *Systems engineering handbook : a guide for system life cycle processes and activities*, 4th éd. John Wiley & Sons.
- International Council on Systems Engineering. 2007. *Systems Engineering Vision 2020*. INCOSE.
- International Telecommunication Union ITU. 2012. *Overview of the Internet of things - ITU-T Y.4000/Y.2060*. ITU.
- Isasa, J. A. E., P. G. Larsen et F. O. Hansen. 2017. « A holistic approach to energy-aware design of cyber-physical systems ». *International Journal of Embedded Systems*, vol. 9, n° 3, p. 283. <<https://doi.org/10.1504/IJES.2017.084682>>.
- Isermann, R. 1996a. « Modeling and design methodology for mechatronic systems ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 1, n° 1, p. 16-28. <<https://doi.org/10.1109/3516.491406>>.
- Isermann, R. 1996b. « On the design and control of mechatronic systems-a survey ». *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, n° 1, p. 4-15. <<https://doi.org/10.1109/41.481402>>.
- Isermann, R. 2002. « Mechatronic Design Approach ». *The Mechatronics Handbook*, Bishop, R. H., p. 27-42. CRC Press.
- Isermann, R. 2006. « Automotive Mechatronic Systems – General Developments and Examples (Mechatronische Systeme in Kraftfahrzeugen – Allgemeine Entwicklungen und Beispiele) ». *Automatisierungstechnik*, vol. 54, n° 9, p. 419-429. <<https://doi.org/10.1524/auto.2006.54.9.419>>.
- Ishigooka, T., H. Saissi, T. Piper, S. Winter et N. Suri. 2017. « Safety Verification Utilizing Model-based Development for Safety Critical Cyber-Physical Systems ». *Journal of Information Processing*, vol. 25, p. 797-810. <<https://doi.org/10.2197/ipsjjip.25.797>>.
- ISO/IEC/IEEE. 2015. *ISO/IEC/IEEE 15288-2015 International Standard - Systems and software engineering - System life cycle processes*, 1st éd., ISO/IEC/IEEE. <<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7106435>>.
- ISO. 2016. *ISO / IEC CD 30141, Information technology - Internet of Things Reference Architecture (IoT RA)*. ISO.

- Issa, A., B. Hatiboglu, A. Bildstein et T. Bauernhansl. 2018. « Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment ». *Procedia CIRP*, vol. 72, p. 973-978.
<<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.151>>.
- Jabbari, R., N. Bin Ali, K. Petersen et B. Tanveer. 2016. « What is DevOps? A systematic mapping study on definitions and practices ». *Proceedings of the Scientific Workshop Proceedings of XP2016 (XP '16 Workshops)*. p.1 -11. ACM Press.
<<https://doi.org/10.1145/2962695.2962707>>.
- Jalali, S. et C. Wohlin. 2012. « Systematic literature studies: Database Searches vs. Backward Snowballing ». *Proceedings of the ACM-IEEE international symposium on Empirical software engineering and measurement - ESEM '12*. p. 29- 38. ACM Press.
<<https://doi.org/10.1145/2372251.2372257>>.
- Jamshidi, M. 2011. *System of Systems Engineering - Innovations for the 21st Century*. WILEY.
- Janocha, H. 2007. *Adaptronics and Smart Structures Basics, Materials, Design and Applications*, 2nd éd. Springer.
- Jansch, J. et H. Birkhofer. 2006. « The development of the guideline VDI 2221 - the change of direction ». *International design conference - DESIGN 2006*, p. 45-52.
- Janthong, N., D. Brissaud et S. Butdee. 2010. « Combining axiomatic design and case-based reasoning in an innovative design methodology of mechatronics products ». *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, n° 4, p. 226-239.
<<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.05.005>>.
- Jara, A. J., L. Ladid et A. Skarmeta. 2013. « The Internet of Everything through IPv6: An Analysis of Challenges, Solutions and Opportunities ». *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, vol. 4, n° 3, p. 97-118.
- Jensen, J. C., D. H. Chang et E. A. Lee. 2011. « A model-based design methodology for cyber-physical systems ». *IWCMC 2011 - 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, p. 1666-1671.
<<https://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982785>>.
- Jerke, G., J. Lienig et J. B. Freuer. 2011. « Constraint-Driven Design Methodology: A Path to Analog Design Automation ». *Analog Layout Synthesis*, Graeb, H. E., p. 269-297. vol. 53. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6932-3_7>.
- Johannesson, P. et E. Perjons. 2014. *An Introduction to Design Science*. Springer International Publishing Switzerland. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-10632-8>>.

- Kagermann, H., W. Wahlster et J. Helbig. 2013. *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*. Rapport de l'Industrie 4.0 WG, acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Kang, B. G., K. M. Seo et T. G. Kim. 2019. « Model-Based Design of Defense Cyber-Physical Systems to Analyze Mission Effectiveness and Network Performance ». *IEEE Access*, vol. 7, p. 42063-42080. <<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907566>>.
- Kannengiesser, U. et J. S. Gero. 2017. « Can Pahl and Beitz' systematic approach be a predictive model of designing? » *Design Science*, vol. 3, p. 1- 20. <<https://doi.org/10.1017/dsj.2017.24>>.
- Kaul, T., T. Meyer et W. Sextro. 2017. « Formulation of reliability-related objective functions for design of intelligent mechatronic systems ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, vol. 231, n° 4, p. 390-399. <<https://doi.org/10.1177/1748006X17709376>>.
- Kawsar, F. 2009. « A document based framework for user centric smart object systems ». Waseda University.
- Kéradec, H. 2012. « Epistémologie et didactique de la gestion : Le cas du concept de décision ». Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Kernschmidt, K., S. Feldmann et B. Vogel-Heuser. 2018. « A model-based framework for increasing the interdisciplinary design of mechatronic production systems ». *Journal of Engineering Design*, vol. 29, n° 11, p. 617-643. <<https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1520205>>.
- Khaitan, S. K. et J. D. McCalley. 2015. « Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey ». *IEEE Systems Journal*, vol. 9, n° 2, p. 350-365. <<https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2322503>>.
- Khan, R., S. U. Khan, R. Zaheer et S. Khan. 2012. « Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges ». *Proceedings - 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012*, p. 257-260. <<https://doi.org/10.1109/FIT.2012.53>>.
- Kim, J. W., S. H. Sul et J. B. Choi. 2018. « Development of user customized smart keyboard using Smart Product Design-Finite Element Analysis Process in the Internet of Things ». *ISA Transactions*, vol. 81, p. 231-243. <<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.05.010>>.
- Kim, K. D. et P. R. Kumar. 2012. « Cyber-physical systems: A perspective at the centennial ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, p. 1287-1308. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189792>>.

- Kiran, C. P., S. Clement et V. P. Agrawal. 2011. « Design for X-abilities of a mechatronic system-a concurrent engineering and graph theory based approach ». *Concurrent Engineering Research and Applications*, vol. 19, n° 1, p. 55-70. <<https://doi.org/10.1177/1063293X11403509>>.
- Kleiner, S. et C. Kramer. 2013. « Model Based Design with Systems Engineering Based on RFLP Using V6 ». *Smart Product Engineering, Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, March 11th - 13th, 2013*, Abramovici, M. et R. Stark, p. 93-102. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_10>.
- Knap, L., J. Mączak et M. Trojgo. 2018. « Process-Oriented Approach to the Design of Cyber-Physical Systems ». *Dynamical Systems in Theoretical Perspective. DSTA 2017. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, Awrejcewicz J., p. 193-204. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96598-7_16>.
- Ko, W. H. 2007. « Trends and frontiers of MEMS ». *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 136, n° 1, p. 62-67. <<https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.001>>.
- Komoto, H. et T. Tomiyama. 2010. « A system architecting tool for mechatronic systems design ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, n° 1, p. 171-174. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.104>>.
- Komoto, H. et T. Tomiyama. 2012. « A framework for computer-aided conceptual design and its application to system architecting of mechatronics products ». *CAD Computer Aided Design*, vol. 44, n° 10, p. 931-946. <<https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.004>>.
- Kortuem, G., D. Alford, L. Ball, J. Busby, N. Davies, C. Efstratiou, J. Finney, M. I. White et K. Kinder. 2007. « Sensor Networks or Smart Artifacts? An Exploration of Organizational Issues of an Industrial Health and Safety Monitoring System ». *UbiComp 2007: Ubiquitous Computing*, Krumm J., G.D. Abowd, A. Seneviratne, T. Strang, p. 465-482. vol. 4717. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74853-3_27>.
- Kortuem, G., F. Kawsar, D. Fitton et V. Sundramoorthy. 2010. « Smart objects as building blocks for the Internet of things ». *IEEE Internet Computing*, vol. 14, n° 1, p. 44-51. <<https://doi.org/10.1109/MIC.2009.143>>.
- Krehmer, H., R. Eckstein, W. Laufer, J. Roelofsen, C. Stöber, A. Troll, N. Weber et J. Zapf. 2009. « Coping with Multidisciplinary Product Development - A Process Model Approach ». *International Conference on Engineering Design – ICED09*, p. 241-252.
- Krishnan, V. et Karl T. Ulrich. 2001. « Product Development Decisions: A Review of the Literature ». *Management Science*, vol. 47, n° 1, p. 1-21. <<https://doi.org/10.1287/mnsc.47.1.1.10668>>.

- Kvale, S. et S. Brinkmann. 2009. *InterViews: Learning the Craft of Qualitative Research Interviewing*. Sage.
- Lapusan, C., V. Maties, R. Balan et O. Hancu. 2010. « Rapid Control Prototyping in Design Process of Mechatronic Systems ». *Solid State Phenomena*, vol. 166-167, p. 247-252. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.166-167.247>>.
- Larsen, P. G., J. Fitzgerald, J. Woodcock, P. Fritzson, J. Brauer, C. Kleijn, T. Lecomte, M. Pfeil, O. Green, S. Basagiannis et A. Sadovykh. 2016. « Integrated tool chain for model-based design of Cyber-Physical Systems: The INTO-CPS project ». *2nd International Workshop on Modelling, Analysis, and Control of Complex CPS, CPS Data 2016*. p. 1- 6. <<https://doi.org/10.1109/CPSData.2016.7496424>>.
- Lasi, H., P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld et M. Hoffmann. 2014. « Industry 4.0 ». *Business and Information Systems Engineering*, vol. 6, n° 4, p. 239-242. <<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>>.
- Laskier, R. 2017. « Modernizing the mining industry with the Internet of Things ». *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, Geng, H., p. 521-544. John Wiley & Sons, Inc.
- Lecun, Y., Y. Bengio et G. Hinton. 2015. « Deep learning ». *Nature*, vol. 521, n° 7553, p. 436-444. <<https://doi.org/10.1038/nature14539>>.
- Lee, E. A. 2008. « Cyber Physical Systems: Design Challenges ». *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, p. 363-369. <<https://doi.org/10.1109/ISORC.2008.25>>.
- Lee, E. A. 2010. « CPS foundations ». *DAC '10: Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, p. 737-742. <<https://doi.org/10.1145/1837274.1837462>>.
- Lee, E. A. et S. A. Seshia. 2011. *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-physical Systems Approach*, 1st éd.
- Lee, E. A. et S. A. Seshia. 2015. *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach*, 2nd éd.
- Lee, I. et K. Lee. 2015. « The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises ». *Business Horizons*, vol. 58, n° 4, p. 431-440. <<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>>.
- Legendre, A., A. Lanusse et A. Rauzy. 2016. « Model synchronisation between architecture system and risk analysis : which gain, how and why ? ». *IMDR, Lamb- daMu20*, p. 1- 10.
- Lennon, T. 2008. « Model-based design for mechatronic systems ». *EngineerIT*, p. 16-20.

- Letia, T. S. et A. O. Kilyen. 2018. « Using Unified Enhanced Time Petri Net Models for Cyber-Physical System Development ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n° 2, p. 248-253. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.043>>.
- Li, L. 2017. « China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0" ». *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 135, p. 66-74. <<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028>>.
- Li, Q., W.J. Zhang et L. Chen. 2001. « Design for control : a concurrent engineering approach for mechatronic systems design ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, n° 2, p. 161-169. <<https://doi.org/10.1109/3516.928731>>.
- Li, R., J. Li et H. Asaeda. 2014. « A Hybrid Trust Management Framework for Wireless Sensor and Actuator Networks in Cyber-Physical Systems ». *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E97-D, n° 10, p. 2586-2596. <<https://doi.org/10.1587/transinf.2013THP0010>>.
- Li, Y., U. Roy et J. S. Saltz. 2017. « Modular Design of Data-Driven Analytics Models in Smart-Product Development ». *Volume 11: Systems, Design, and Complexity*, p. 1- 10. ASME. <<https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71597>>.
- Liker, J. K. et J. M. Morgan. 2006. « The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development ». *Academy of Management Perspectives*, vol. 20, n° 2, p. 5-20. <<https://doi.org/10.5465/AMP.2006.20591002>>.
- Lindemann, U. 2003. « Methods are networks of methods ». *ICED 03*, vol. DS31, p. 625- 634.
- Lindemann, U., M. Maurer et T. Braun. 2009. « Modeling the Multiple-Domain Matrix ». *Structural Complexity Management*, p. 67-78. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-87889-6_5>.
- Liu, J. et J. Lin. 2019. « Design optimization of WirelessHART networks in Cyber-Physical Systems ». *Journal of Systems Architecture*, vol. 97, p. 168- 184. <<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.011>>.
- Liu, J., P. Wang, J. Lin et C. H. Chu. 2018. « A Controller/Architecture Co-design Framework for Wireless Cyber-Physical Systems ». *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Internet of Things, IEEE Green Computing and Communications, IEEE Cyber, Physical and Social Computing, IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCo-SmartData 2017*, p. 76-84. <<https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCo-SmartData.2017.17>>.
- Liu, J. et X. Wu. 2019. « Controller and architecture co-design of wireless cyber-physical systems ». *Journal of Systems Architecture*, vol. 94, p. 42-59. <<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.006>>.

- Liu, J. et L. Zhang. 2011. « Aspect-oriented MDA development method for non-functional properties of cyber physical systems ». *Proceedings - 2nd International Conference on Networking and Distributed Computing, ICNDC 2011*, p. 149-153. <<https://doi.org/10.1109/ICNDC.2011.76>>.
- Liu, Y., Y. Peng, B. Wang, S. Yao et Z. Liu. 2017. « Review on cyber-physical systems ». *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, n° 1, p. 27-40. <<https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>>.
- Lohmann, S., S. Negru, F. Haag et T. Ertl. 2016. « Visualizing ontologies with VOWL ». *Semantic Web*, vol. 7, n° 4, p. 399-419. <<https://doi.org/10.3233/SW-150200>>.
- López-Mesa, B. 2003. « Selection and use of engineering design methods using creative problem solving ». Luleå University of Technology.
- Luedeke, T. F., C. Köhler, J. Conrad, M. Grashiller, A. Sailer et M. Vielhaber. 2018. « CPM / PDD in the context of Design Thinking and Agile Development of Cyber-Physical Systems ». *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018*, vol. DS91, p. 1- 10.
- Lukei, M., B. Hassan, R. Dumitrescu, T. Sigges et V. Derksen. 2016. « Modular Inspection Equipment Design for Modular Structured Mechatronic Products – Model Based Systems Engineering Approach for an Integrative Product and Production System Development ». *Procedia Technology*, vol. 26, p. 455-464. <<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.058>>.
- Lyshevski, S.E. 2004. « MEMS and NEMS - systems, devices, and structures ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 20, n° 4, p. 46. <<https://doi.org/10.1109/MEI.2004.1318850>>.
- Maass, W. et U. Varshney. 2008. « Preface to the Focus Theme Section: “Smart Products” ». *Electronic Markets*, vol. 18, n° 3, p. 211-215. <<https://doi.org/10.1080/10196780802265645>>.
- Mabrouk, A., O. Penas, R. Plateaux, M. Barkallah, J. Y. Choley et A. Akrouit. 2018. « Integration of agility in a MBSE methodology for multidisciplinary systems design ». *4th IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2018 - Proceedings*, p. 1-5. <<https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544425>>.
- Mahalik, N., C. Xie, J. Pu et P. R. Moore. 2006. « Virtual distributed control systems: A components-based design method for mechatronic systems ». *Assembly Automation*, vol. 26, n° 1, p. 44-53. <<https://doi.org/10.1108/01445150610645657>>.
- Mahut, F. 2019. « Intégration des approches PLM et SLM pour le développement et la gestion des Systèmes Produit-Service en contexte automobile : proposition d’un cadre méthodologique ». Université de Technologie de Compiègne.

- Maier, M. W. 1998. « Architecting Principles for Systems-of-Systems ». *Systems Engineering*, vol. 1, n° 4, p. 267-284. <[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6858\(1998\)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6858(1998)1:4<267::AID-SYS3>3.0.CO;2-D)>.
- Malik, M. A. et S. A. Kayani. 2008. « Verifying experiment for automated design of mechatronic systems using Bond-Graph modelling and simulation and genetic programming ». *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 32, n° 3, p. 173- 180. <<https://doi.org/10.1504/ijcat.2008.020952>>.
- Malmquist, D., D. Frede et J. Wikander. 2014. « Holistic design methodology for mechatronic systems ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 228, n° 10, p. 741-757. <<https://doi.org/10.1177/0959651814527936>>.
- Mann, D. L. 2010. *Hands-on Systematic Innovation*. IFR Press.
- Marconnet, B., F. Demoly, D. Monticolo et S. Gomes. 2017. « An assembly oriented design and optimization approach for mechatronic system engineering ». *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, vol. 8, p. 1- 10. <<https://doi.org/10.1051/smdo/2016016>>.
- Marwedel, P. 2018. *Embedded System Design*, 3rd éd. Coll. « Embedded Systems ». Springer International Publishing. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-56045-8>>.
- Matt, C., T. Hess et A. Benlian. 2015. « Digital Transformation Strategies ». *Business and Information Systems Engineering*, vol. 57, n° 5, p. 339-343. <<https://doi.org/10.1007/s12599-015-0401-5>>.
- Mcharek, M., T. Azib, M. Hammadi, J. Y. Choley et C. Larouci. 2018. « Knowledge sharing for mechatronic systems design and optimization ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n° 11, p. 1365-1370. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.338>>.
- Mcharek, M., M. Hammadi, T. Azib, C. Larouci et J. Y. Choley. 2019. « Collaborative design process and product knowledge methodology for mechatronic systems ». *Computers in Industry*, vol. 105, p. 213-228. <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.008>>.
- Mellal, M. A., S. Adjerid et D. Benazzouz. 2011. « Modeling and Simulation of Mechatronic System to Integrated Design of Supervision: Using a Bond Graph Approach ». *Applied Mechanics and Materials*, vol. 86, p. 467-470. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.86.467>>.
- Merlo, C., A. Abi Akle, A. Llaría, G. Terrasson, E. Villeneuve et V. Pilnière. 2019. « Proposal of a user-centred approach for CPS design: pillbox case study ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n° 34, p. 196-201. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.01.065>>.

- Merlo, C. et P. Girard. 2004. « Information system modelling for engineering design co-ordination ». *Computers in Industry*, vol. 55, n° 3, p. 317-334.
<<https://doi.org/10.1016/j.compind.2004.08.008>>.
- Merschak, S. et P. Hehenberger. 2019. « Ecodesign Methods for Mechatronic Systems: A Literature Review and Classification ». *2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, p. 1-8. IEEE.
<<https://doi.org/10.1109/REM.2019.8744105>>.
- Meyer, M. 2014. « Continuous Integration and Its Tools ». *IEEE Software*, vol. 31, n° 3, p. 14-16. <<https://doi.org/10.1109/MS.2014.58>>.
- Mhenni, F., J. Y. Choley, O. Penas, R. Plateaux et M. Hammadi. 2014. « A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 218-231. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.03.006>>.
- Michaelis, M. T. 2013. « Co-Development of Products and Manufacturing Systems Using Integrated Platform Models ». Chalmers University of Technology.
<<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3500.0405>>.
- Miorandi, D., S. Sicari, F. De Pellegrini et I. Chlamtac. 2012. « Internet of things: Vision, applications and research challenges ». *Ad Hoc Networks*, vol. 10, n° 7, p. 1497-1516.
<<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>>.
- Miranda, J., R. Pérez-Rodríguez, V. Borja, P. K. Wright et A. Molina. 2017. « Sensing, smart and sustainable product development (S³product) reference framework ». *International Journal of Production Research*, vol. 57, n° 14, p. 4391- 4412.
<<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401237>>.
- Moeuf, A., R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo et R. Barbaray. 2018. « The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0 ». *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 3, p. 1118-1136.
<<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>>.
- Mohebbi, A., S. Achiche et L. Baron. 2018. « Multi-criteria fuzzy decision support for conceptual evaluation in design of mechatronic systems: a quadrotor design case study ». *Research in Engineering Design*, vol. 29, n° 3, p. 329-349.
<<https://doi.org/10.1007/s00163-018-0287-6>>.
- Monostori, L., B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn et K. Ueda. 2016. « Cyber-physical systems in manufacturing ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 65, n° 2, p. 621-641.
<<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>>.

- Mueller, R. et K. Thoring. 2012. « Design Thinking vs. Lean Startup: A comparison of two user-driven innovation strategies ». *2012 International Design Management Research Conference*. p. 1- 12.
- Mühlhäuser, M. 2007. « Smart Products : An Introduction ». *Ambient Intelligence 2007 Workshops. Constructing Ambient Intelligence. AmI 2007*. Mühlhäuser M., A. Ferscha, E. Aitenbichler. vol. 11, p. 158-164. Springer Verlag Berlin.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-85379-4_20>.
- Mule, S., R. Plateaux, P. Hehenberger, O. Penas, S. Patalano et F. Vitolo. 2020. « A New Agile Hybridization Approach and a Set of Related Guidelines for Mechatronic Product Development ». *Product Lifecycle Management Enabling Smart X. 17th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2020*, Nyffenegger F., J. Ríos, L. Rivest, A. Bouras. vol. 594, p. 618-633. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62807-9_49>.
- Nagel, R. N. et R. Dove. 1991. *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy-an Industry led View*. Iacocca Institute, Lehigh University.
- Nattermann, R. et R. Anderl. 2010. « Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the development of adaptronic systems ». *Proceedings for the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, p. 379- 387. <<https://doi.org/10.1115/IMECE2010-37828>>.
- Nattermann, R. et R. Anderl. 2013. « The W-model using systems engineering for adaptronics ». *Procedia Computer Science*, vol. 16, p. 937-946.
<<https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.01.098>>.
- Nijssen, E. J. et R. T. Frambach. 2000. « Determinants of the Adoption of New Product Development Tools by Industrial Firms ». *Industrial Marketing Management*, vol. 29, n° 2, p. 121-131. <[https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(98\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(98)00043-1)>.
- Niu, Y., C. Anumba et W. Lu. 2019. « Taxonomy and Deployment Framework for Emerging Pervasive Technologies in Construction Projects ». *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 145, n° 5, p. 1- 13. <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001653](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001653)>.
- Nolin, J. et N. Olson. 2016. « The Internet of Things and convenience ». *Internet Research*, vol. 26, n° 2, p. 360-376. <<https://doi.org/10.1108/IntR-03-2014-0082>>.
- Nunes, M. L., A. C. Pereira et A. C. Alves. 2017. « Smart products development approaches for Industry 4.0 ». *Procedia Manufacturing*, vol. 13, p. 1215-1222.
<<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.035>>.

- Nuzzo, P., J. Li, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, Y. Xi et D. Li. 2019. « Stochastic Assume-Guarantee Contracts for Cyber-Physical System Design ». *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 18, n° 1, p. 1-26. <<https://doi.org/10.1145/3243216>>.
- Nuzzo, P., A. L. Sangiovanni-Vincentelli, D. Bresolin, L. Geretti et T. Villa. 2015. « A Platform-Based Design Methodology With Contracts and Related Tools for the Design of Cyber-Physical Systems ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n° 11, p. 2104-2132. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2453253>>.
- Nyman, J. et K. Främling. 2008. « Gathering Product Data from Smart Products ». *10th International Conference on Enterprise Information Systems*. p. 252- 257.
- O'Halloran, B. M., N. Papakonstantinou et D. L. Van Bossuyt. 2018. « Assessing the Consequence of Cyber and Physical Malicious Attacks in Complex, Cyber-Physical Systems During Early System Design ». *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. p. 733-740. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/INDIN.2018.8471937>>.
- Odini, M. P. 2016. *Objets connectés : enjeu de la 5G - Évolution des réseaux M2M et IoT*. Techniques de l'ingénieur.
- Oestersötebier, F., V. Just, A. Trächtler, F. Bauer et S. Dziwok. 2012. « Model-Based Design of Mechatronic Systems by Means of Semantic Web Ontologies and Reusable Solution Elements ». *Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Volume 3: Advanced Composite Materials and Processing; Robotics; Information Management and PLM; Design Engineering*. p. 647- 656. ASME. <<https://doi.org/10.1115/ESDA2012-82324>>.
- Olson, N., J. M. Nolin et G. Nelhans. 2015. « Semantic web, ubiquitous computing, or internet of things? A macro-analysis of scholarly publications ». *Journal of Documentation*, vol. 71, n° 5, p. 884-916. <<https://doi.org/10.1108/JD-03-2013-0033>>.
- Orwat, C., A. Graefe et T. Faulwasser. 2008. « Towards pervasive computing in health care - A literature review ». *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 8, p. 1-18. <<https://doi.org/10.1186/1472-6947-8-26>>.
- Osman, K., D. Stamenkovic et M. Lazarevic. 2013. « Integration of system design and production processes in robust mechatronic product architectures development - extended M-FBFP framework ». *Hemijaska industrija Chemical Industry*, vol. 67, n° 5, p. 759-771. <<https://doi.org/10.2298/hemind121109003o>>.
- Ovtcharova, J. G. 2010. « Virtual engineering: Principles, methods and applications ». *11th International Design Conference, DESIGN2010*, p. 1267-1274.

- Paes, I. F., R. C. Sabioni, J. Daaboul et J. Le Duigou. 2018. « Product and Process Modular Design : a Review ». *8th International Conference on Mass Customization and Personalization – Community of Europe: Digital Customer Experience*, p. 1-10.
- Paetzold, K. 2017. « Product and Systems Engineering/CA* Tool Chains ». *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems*, Biffl, S., A. Lüder et D. Gerhard, p. 27-62. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56345-9_2>.
- Pahl, G., W. Beitz, J. Feldhusen et K. H. Grote. 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer London. <<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2>>.
- Paluch, S., D. Antons, M. Brettel, C. Hopp, T. O. Salge, F. Piller et D. Wentzel. 2019. « Stage-gate and agile development in the digital age: Promises, perils, and boundary conditions ». *Journal of Business Research*, p. 495-501. <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.063>>.
- Pannaga, N., N. Ganesh et R. Gupta. 2013. « Mechatronics — An Introduction to Mechatronics ». *International Journal of Engineering*, vol. 2, p. 128-134. <<https://doi.org/0849363586>>.
- Paulk, M.C., B. Curtis, M.B. Chrissis et C.V. Weber. 1993. « Capability maturity model, version 1.1 ». *IEEE Software*, vol. 10, n° 4, p. 18- 27. <<https://doi.org/10.1109/52.219617>>.
- Paviot, T. 2010. « Méthodologie de résolution des problèmes d'interopérabilité dans le domaine du Product Lifecycle Management ». École Centrale Paris.
- Payette, M. 2001. « Interdisciplinarité : clarification des concepts ». *Interactions*, vol. 5, n° 1, p. 19-36.
- Pellerin, R., Louis R. et C. Danjou. 2016. *Prendre part à la révolution manufacturière ? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*. CEFRIO.
- Penas, O., R. Plateaux, J. Y. Choley, H. Kadima, T. Soriano, C. Combastel et A. Rivière. 2010. *Conception mécatronique - Vers un processus continu de conception mécatronique intégrée*. Techniques de l'Ingénieur.
- Penas, O., R. Plateaux, S. Patalano et M. Hammadi. 2017. « Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems ». *Computers in Industry*, vol. 86, p. 52-69. <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>>.

- Perera, C., A. Zaslavsky, P. Christen et D. Georgakopoulos. 2014. « Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey ». *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, n° 1, p. 414-454.
<<https://doi.org/10.1109/SURV.2013.042313.00197>>.
- Pérez-Rodríguez, R., A. Molina, J. Miranda, V. Borja et P. K. Wright. 2018. « The requirements specification of mechatronic products based-on the Integrated product, process and manufacturing development model. » *Ingenieria Mecanica*, n° 3, p. 145-152.
<<https://doi.org/133573268>>.
- Pietruszewicz, K. 2019. « Metamodelling for Design of Mechatronic and Cyber-Physical Systems ». *Applied Sciences*, vol. 9, n° 3 : 376, p. 1- 40.
<<https://doi.org/10.3390/app9030376>>.
- Plateaux, R., O. Penas, J. Y. Choley, F. Mhenni et A. Rivière. 2010. « Integrated design methodology of a mechatronic system ». *Mécanique & Industries*, vol. 11, n° 5, p. 401-406. <<https://doi.org/10.1051/meca/2010052>>.
- Plateaux, R., O. Penas, J. Y. Choley, F. Mhenni, M. Hammadi et F. Louni. 2016. « Evolution from Mechatronics to Cyber Physical Systems: an educational point of view ». *MECATRONICS-REM 2016*. p. 360-366. IEEE.
- Plateaux, R., O. Penas, S. Mule, P. Hehenberger, S. Patalano et F. Vitolo. 2020. « SCRUM++ Framework concepts ». *2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. p. 1-8. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/ISSE49799.2020.9272233>>.
- Porter, M. E. et J. E. Heppelmann. 2014. « How smart, Connected Products Are Transforming Competition ». *Harvard Business Review*, October, p. 97-114.
- Posada, J., C. Toro, I. Barandiaran, D. Oyarzun, D. Stricker, R. de Amicis, E. B. Pinto, P. Eisert, J. Dollner et I. Vallarino. 2015. « Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet ». *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 35, n° 2, p. 26-40. <<https://doi.org/10.1109/MCG.2015.45>>.
- Poslad, S. 2009. *Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions*, 1st éd. John Wiley & Sons.
- Pugh, S. 1991. *Total design: integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley.
- Qi, J., J. Hu et Y. H. Peng. 2018. « An integrated principle solution synthesis method in multi-disciplinary mechatronic product conceptual design ». *Concurrent Engineering Research and Applications*, vol. 26, n° 4, p. 341-354.
<<https://doi.org/10.1177/1063293X18799488>>.

- R.Rothful, N.A., M. Lasa, H. M. Heinkel et P. Tirgari. 2006. « Systems engineering in the design of mechatronic systems ». *International Journal of Vehicle Design*, vol. 28, n° 1/2/3, p. 1- 17. <<https://doi.org/10.1504/ijvd.2002.001976>>.
- Raghav, G. et S. Gopalswamy. 2009. « Architecture Driven Development for Cyber Physical Systems ». *SAE International Journal of Aerospace*, vol. 3, n° 1, p. 95-100. <<https://doi.org/10.4271/2009-01-3263>>.
- Rahimi, N. et M. Ibarra. 2014. « A Review of Multiple User Center Design Methods for New Product Development in Smart and Connected Health Applications ». *2014 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology (Picmet)*, p. 3498-3510.
- Rajhans, A., S. W. Cheng, B. Schmerl, D. Garlan, B. H. Krogh, C. Agbi et A. Bhavé. 2009. « An Architectural Approach to the Design and Analysis of Cyber-Physical Systems An Architectural Approach to the Design and Analysis of Cyber-Physical Systems ». *Proceedings of the 3rd International Workshop on Multi-Paradigm Modeling (MPM 2009)*, vol. 21, p. 1- 10.
- Rajkumar, R. 2012. « A cyber-physical future ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, p. 1309-1312. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189915>>.
- Rajkumar, R., I. Lee, L. Sha et J. Stankovic. 2010. « Cyber-physical systems: The next computing revolution ». *Proceedings - Design Automation Conference*, p. 731-736. <<https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>>.
- Rauch, E., P. Dallasega et D. T. Matt. 2016. « The Way from Lean Product Development (LPD) to Smart Product Development (SPD) ». *Procedia CIRP*, vol. 50, p. 26-31. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.081>>.
- Rauniyar, D. et U. J. Tanik. 2010. « Integrated product development approach for cyber-physical system utilizing standardized modelling languages and methodologies ». *Transaction of the SDPS*, vol. 14, n° 3, p. 1-11.
- Renner, F. M., K. J. Hoffmann, R. Markert et M. Glesner. 2000. « Design methodology of application specific integrated circuits for mechatronic systems ». *Microprocessors and Microsystems*, vol. 24, n° 2, p. 95-103. <[https://doi.org/10.1016/S0141-9331\(99\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0141-9331(99)00071-X)>.
- Riel, A., C. Kreiner, R. Messnarz et A. Much. 2018. « An architectural approach to the integration of safety and security requirements in smart products and systems design ». *CIRP Annals*, vol. 67, n° 1, p. 173-176. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.022>>.
- Ries, E. 2011. *The Lean Startup*. Crown Business.

- Rijsdijk, S. A. et E. J. Hultink. 2009. « How today's consumers perceive tomorrow's smart products ». *Journal of Product Innovation Management*, vol. 26, n° 1, p. 24-42. <<https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2009.00332.x>>.
- Robin, V. et P. Girard. 2010. « An integrated product-process-organisation model to manage design systems ». *International Journal of Product Development*, vol. 10, n° 4, p. 318-337. <<https://doi.org/10.1504/IJPD.2010.031977>>.
- Roblek, V., M. Meško et A. Krapež. 2016. « A Complex View of Industry 4.0 ». *SAGE Open*, vol. 6, n° 2. <<https://doi.org/10.1177/2158244016653987>>.
- Roozenburg, N. F. M. et J. Eekels. 1995. *Product design : fundamentals and methods*. Wiley.
- Rowley, J. 2012. « Conducting research interviews ». *Management Research Review*, vol. 35, n° 3-4, p. 260-271. <<https://doi.org/10.1108/01409171211210154>>.
- Royce, W. W. 1970. « Managing the development of large software systems ». *Proceedings IEEE Wescon*, p. 328-338.
- Rúbio, E. M., R. P. Dionísio et P. M. B. Torres. 2019. « Industrial IoT Devices and Cyber-Physical Production Systems: Review and Use Case ». *Innovation, Engineering and Entrepreneurship, HELIX 2018*, Machado, J., F. Soares et G. Veiga, p. 292-298. vol. 505. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_40>.
- Rui-Qin, L. et Z. Hui-Jun. 2005. « A new symbolic representation method to support conceptual design of mechatronic system ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, n° 7-8, p. 619-627. <<https://doi.org/10.1007/s00170-004-1904-2>>.
- Rüßmann, M., M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel et M. Harnisch. 2015. *Industry 4.0 The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Rapport du Boston Consulting Group.
- Sabados, D., P. Componation, S. O'Brien, F. Shull, R. Turner et E. Colbert. 2010. « A survey of agile methods, processes, and tools ». *Annual Forum Proceedings - AHS International*, vol. 3, p. 2452-2463.
- Säde, S. 1999. « Representations of Smart Product Concepts in User Interface Design ». *Human Factors in Product Design: Current Practice and Future Trends*, Green, W. S. et P. W. Jordan, p. 64-72. CRC Press.
- Sadlauer, A. et P. Hehenberger. 2017. « Using design languages in model-based mechatronic system design processes ». *International Journal of Agile Systems and Management*, vol. 10, n° 1, p. 73. <<https://doi.org/10.1504/ijasm.2017.10003875>>.

- Saha, D. et A. Mukherjee. 2003. « Pervasive computing: A paradigm for the 21st century ». *Computer*, vol. 36, n° 3, p. 25- 31. <<https://doi.org/10.1109/MC.2003.1185214>>.
- Salman, T. et R. Jain. 2016. « Networking protocols and standards for Internet of Things ». *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, Geng, H., p. 215-238. John Wiley & Sons, Inc. <<https://doi.org/10.1002/9781119173601.ch13>>.
- Salminen, V. et A. Verho. 1992. « Systematic and innovative design of a mechatronic product ». *Mechatronics*, vol. 2, n° 3, p. 257-275. <[https://doi.org/10.1016/0957-4158\(92\)90020-O](https://doi.org/10.1016/0957-4158(92)90020-O)>.
- Sanchez, L. M. et R. Nagi. 2001. « A review of agile manufacturing systems ». *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 16, p. 3561-3600. <<https://doi.org/10.1080/00207540110068790>>.
- Sangiovanni-Vincentelli, A., L. Carloni, F. De Bernardinis et M. Sgroi. 2004. « Benefits and challenges for platform-based design ». *DAC '04: Proceedings of the 41st annual Design Automation Conference*, p. 409- 414. <<https://doi.org/10.1145/996566.996684>>.
- Sangiovanni-Vincentelli, A., W. Damm et R. Passerone. 2012. « Taming Dr. Frankenstein: Contract-Based Design for Cyber-Physical Systems ». *European Journal of Control*, vol. 18, n° 3, p. 217-238. <<https://doi.org/10.3166/ejc.18.217-238>>.
- Sangregorio, P., A. L. Cologni, A. Piccinini, A. Scarpellini et F. Previdi. 2015. « A method for automation software design of mechatronic systems in manufacturing ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, n° 3, p. 936-941. <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.203>>.
- Schabacker, M., N. Szélig et S. Vajna. 2013. « Suitable methods for process modeling and process optimization ». *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED13*, vol. 1, DS75, p. 429-438.
- Schmüdderrich, T., A. Trächtler, J. Brökelmann et J. Gausemeier. 2013. « Procedural Model for the Virtual Commissioning on the Basis of Model-Based Design ». *23rd CIRP Design Conference*, Abramovici, M. et R. Stark, p. 23-32. Coll. « Lecture Notes in Production Engineering ». Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_3>.
- Schramm, D., W. Lalo et M. Unterreiner. 2010. « Application of Simulators and Simulation Tools for the Functional Design of Mechatronic Systems ». *Solid State Phenomena*, vol. 166-167, p. 1-14. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.166-167.1>>.

- Schuh, G., S. Rudolf et F. Diels. 2015. « Methodology for the evaluation and selection of the suitability of highly iterative product development methods for individual segments of an overall development project ». *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. p. 661-665. IEEE.
<<https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385730>>.
- Schuh, G., S. Rudolf et M. Riesener. 2016. « Design for industrie 4.0 ». *Proceedings of International Design Conference - DESIGN2016*, vol. DS 84, p. 1387-1396.
<<https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>>.
- Schuh, G., S. Rudolf et S. Breunig. 2016. « Modular Platform Design for Mechatronic Systems using Axiomatic Design and Mechatronic Function Modules ». *Procedia CIRP*, vol. 50, p. 701-706. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.035>>.
- Schwab, K. 2016. *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum.
- Schwaber, K. 1997. « SCRUM Development Process ». *Business Object Design and Implementation*, Sutherland J., C. Casanave, J. Miller, P. Patel, G. Hollowell, p. 117-134. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0947-1_11>.
- Schweiger, W., D. Levichev, A. Schön et H. Meerkamm. 1999. « Digital mock-up in the early stages of mechatronic product design ». *Journal of Engineering Design*, vol. 10, n° 3, p. 235-246. <<https://doi.org/10.1080/095448299261308>>.
- Seshia, S. A., S. Hu, W. Li et Q. Zhu. 2017. « Design Automation of Cyber-Physical Systems: Challenges, Advances, and Opportunities ». *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 36, n° 9, p. 1421-1434.
<<https://doi.org/10.1109/TCAD.2016.2633961>>.
- Sha, L., S. Gopalakrishnan, X. Liu et Q. Wang. 2009. « Cyber-Physical Systems: A New Frontier ». *Machine Learning in Cyber Trust*, p. 3-13. Springer US.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-88735-7_1>.
- Shravani, N. K. et M. Peshkin. 2018. « Introducing Robots without Creating Fear of Unemployment and High Cost in Industries ». *International Journal of Engineering Technology Science and Research IJETSR*, vol. 5, n° 1, p. 1128-1135.
- Sierla, S., I. Tumer, N. Papakonstantinou, K. Koskinen et D. Jensen. 2012. « Early integration of safety to the mechatronic system design process by the functional failure identification and propagation framework ». *Mechatronics*, vol. 22, n° 2, p. 137-151.
<<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.01.003>>.

- Sini, J., M. Violante et R. Dessi. 2018. « Computer-Aided Design of Multi-Agent Cyber-Physical Systems ». *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, p. 677-684. IEEE.
<<https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502448>>.
- Sinkovics, R. R., E. Penz et P. N. Ghauri. 2005. « Analysing textual data in international marketing research ». *Qualitative Market Research: An International Journal*, vol. 8, n° 1, p. 9-38. <<https://doi.org/10.1108/13522750510575426>>.
- Slomka, F., S. Kollmann, S. Moser et K. Kempf. 2011. « A multidisciplinary design methodology for cyber-physical systems ». *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 795, p. 23-37. <<https://doi.org/10.1109/IWCMC.2011.5982785>>.
- Sommerville, I. 2010. *Software Engineering*, 9th éd. Pearson.
- Song, Y., J. Park, K. C. Lee et S. Lee. 2019. « Reducing the Design Complexity of Automated Vehicle Electrical and Electronic Systems Using a Cyber-physical System Concept ». *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 17, n° 2, p. 500-508. <<https://doi.org/10.1007/s12555-018-0246-z>>.
- Spitas, C. 2011. « Analysis of systematic engineering design paradigms in industrial practice: A survey ». *Journal of Engineering Design*, vol. 22, n° 6, p. 427-445.
<<https://doi.org/10.1080/09544820903437734>>.
- Stark, J. 2016. *Product Lifecycle Management (Volume 2)*. 3rd éd. Springer, Cham.
<<https://doi.org/10.1007/978-3-319-24436-5>>.
- Steiner, P. 2010. « Philosophie, technologie et cognition. États des lieux et perspectives ». *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, vol. 53, p. 7-40.
<<https://doi.org/10.3406/intel.2010.1176>>.
- Stelzmann, E. 2012. « Contextualizing agile systems engineering ». *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 27, n° 5, p. 17-22.
<<https://doi.org/10.1109/MAES.2012.6226690>>.
- Stetter, R. et U. Lindemann. 2005. « The transfer of methods into industry ». *Design process improvement*, Clarkson J. et C. Eckert, p. 436-459. Springer London.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-061-0_19>.
- Stolberg, S. 2009. « Enabling agile testing through continuous integration ». *Proceedings - 2009 Agile Conference, AGILE 2009*, p. 369-374.
<<https://doi.org/10.1109/AGILE.2009.16>>.

- Streitz, N. A., C. Röcker, T. Prante, D. van Alphen, R. Stenzel et C. Magerkurth. 2005. « Designing smart artifacts for smart environments ». *Computer*, vol. 38, n° 3, p. 41-49. <<https://doi.org/10.1109/MC.2005.92>>.
- Suh, N. P. 1998. « Axiomatic Design Theory for Systems ». *Research in Engineering Design*, vol. 10, n° 4, p. 189-209. <<https://doi.org/10.1007/s001639870001>>.
- Sundmaecker, H., P. Guillemin, P. Friess et S. Woelfflé. 2010. *Vision and challenges for realizing the internet of things*. Rapport de l'Union Européenne. <<https://doi.org/10.2759/26127>>.
- Sünnetcioglu, A., E. Brandenburg, U. Rothenburg et R. Stark. 2016. « ModelTracer: User-friendly Traceability for the Development of Mechatronic Products ». *Procedia Technology*, vol. 26, p. 365-373. <<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.047>>.
- Sztipanovits, J., T. Bapty, X. Koutsoukos, Z. Lattmann, S. Neema et E. Jackson. 2018. « Model and Tool Integration Platforms for Cyber-Physical System Design ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 9, p. 1501-1526. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2838530>>.
- Tan, Y., S. Goddard et L. C. Pérez. 2008. « A prototype architecture for cyber-physical systems ». *ACM SIGBED Review*, vol. 5, n° 1, p. 1-2. <<https://doi.org/10.1145/1366283.1366309>>.
- Tariq, M. U., J. Florence et M. Wolf. 2018. « Improving the safety and security of wide-area cyber-physical systems through a resource-aware, service-oriented development methodology ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 1, p. 144-159. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2744645>>.
- Terzi, S., A. Bouras, D. Dutta, M. Garetti et D. Kiritsis. 2010. « Product lifecycle management - from its history to its new role ». *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 4, n° 4, p. 360- 389. <<https://doi.org/10.1504/IJPLM.2010.036489>>.
- Thebault, P. 2013. « La conception à l'ère de l'Internet des Objets : modèles et principes pour le design de produits aux fonctions augmentées par des applications ». École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ENSAM.
- Thia, C. W., K. H. Chai, J. Bauly et Y. Xin. 2005. « An exploratory study of the use of quality tools and techniques in product development ». *TQM Magazine*, vol. 17, n° 5, p. 406-424. <<https://doi.org/10.1108/09544780510615924>>.
- Thomas, O. et M. Fellmann. 2009. « Semantic process modeling—design and implementation of an ontology-based representation of business processes ». *Business & Information Systems Engineering*, vol. 1, n° 6, p. 438-451.

- Thoring, K. et R. M. Müller. 2011. « Understanding Design thinking: a process model based on method engineering ». *Proceedings of E&PDE 2011, the 13th International Conference on Engineering and Product Design Education*, vol. DS 69, p. 493- 498.
- Tomiyama, T., V. D'Amelio, J. Urbanic et W. ElMaraghy. 2007. « Complexity of Multi-Disciplinary Design ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, n° 1, p. 185-188. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.044>>.
- Tomiyama, T., P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind et F. Kimura. 2009. « Design methodologies: Industrial and educational applications ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 58, n° 2, p. 543-565. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.003>>.
- Tomiyama, T., E. Lutters, R. Stark et M. Abramovici. 2019. « Development capabilities for smart products ». *CIRP Annals*, vol. 68, n° 2, p. 727- 750. <<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.010>>.
- Tomizuka, M. 2002. « Mechatronics: from the 20th to 21st century ». *Control Engineering Practice*, vol. 10, n° 8, p. 877-886. <[https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00016-3)>.
- Tomizuka, M. 2006. « Sensing rich design of drive trains for mechatronic systems ». *Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, vol. 6174, p. 1- 7. <<https://doi.org/10.1117/12.659962>>.
- Torry-Smith, J. M., S. Achiche, N. H. Mortensen, A. Qamar, J. Wikander et C. During. 2011. « Mechatronic Design - Still a Considerable Challenge ». *Volume 9: 23rd International Conference on Design Theory and Methodology; 16th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference*. p. 33-44. ASME. <<https://doi.org/10.1115/DETC2011-48306>>.
- Torry-Smith, J. M. et N. H. Mortensen. 2011. « A mechatronic case study highlighting the need for re-thinking the design approach ». *ICED11 - 18th International Conference on Engineering Design - Impacting Society Through Engineering Design*, vol. 1, p. 276-287.
- Turki, S., T. Soriano et A. Sghaier. 2005. « A SysML profile for mechatronics integrating bond graphs ». *9th WSEAS International Conference Circuits, Communications, Computers (CSCC'05)*. p. 1- 6.
- Uckelmann, D., M. Harrison et F. Michahelles. 2011. *Architecting the Internet of Things*. Springer, Berlin, Heidelberg. <<https://doi.org/10.1007/978-3-642-19157-2>>.
- Ullman, D. G. 2009. *The Mechanical Design Process*, 4th éd. McGraw-Hill Education.
- Ulrich, K. T. et S. D. Eppinger. 2004. *Product Design and Development*, 3rd éd. McGraw-Hill.
- Ulrich, K. T. et S. D. Eppinger. 2016. *Product Design and Development*, 6th éd. McGraw-Hill.

- Ulsoy, A. G. 2019. « Smart product design for automotive systems ». *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 14, n° 1, p. 102-112. <<https://doi.org/10.1007/s11465-019-0527-0>>.
- Umeda, Y., M. Ishii, M. Yoshioka, Y. Shimomura et T. Tomiyama. 1996. « Supporting conceptual design based on the function-behavior-state modeler ». *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 10, n° 4, p. 275-288. <<https://doi.org/10.1017/s0890060400001621>>.
- Unger, D. et S. Eppinger. 2011. « Improving product development process design: A method for managing information flows, risks, and iterations ». *Journal of Engineering Design*, vol. 22, n° 10, p. 689-699. <<https://doi.org/10.1080/09544828.2010.524886>>.
- Unger, D. W. et S. D. Eppinger. 2009. « Comparing product development processes and managing risk ». *International Journal of Product Development*, vol. 8, n° 4, p. 382-402. <<https://doi.org/10.1504/IJPD.2009.025253>>.
- Vajna, S. 2005. « Workflow for design ». *Design process improvement*, Clarkson, J. et C. Eckert, p. 366-385. London : Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-061-0_16>.
- Vajna, S., S. Clement, A. Jordan et T. Bercsey. 2005. « The Autogenetic Design Theory: An evolutionary view of the design process ». *Journal of Engineering Design*, vol. 16, n° 4, p. 423-440. <<https://doi.org/10.1080/09544820500267781>>.
- Vajna, S. et K. Kittel. 2009. « An approach to compare product development methods ». *ICED'09*, p. 313-324.
- Valasek, M. 2016. « Highly efficient models and simulations - The basis of design of mechatronic systems ». *Metallurgy*, vol. 49, n°2, p. 127- 131.
- Vasić, V. S. et M. P. Lazarević. 2008. « Standard Industrial Guideline for Mechatronic Product Design ». *FME Transactions*, vol. 36, p. 103-108.
- VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik. 2004. *VDI-Guideline 2206 : Design methodology for mechatronic system*. Verein Deutscher Ingenieure - VDI.
- Veitl, A., T. Gordon, A. Van de Sand, M. Howell, M. Valasek, O. Vaculin et P. Steinbauer. 2000. « Methodologies for Coupling Simulation Models and Codes in Mechatronic System Analysis and Design ». *The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks*, vol. 33, p. 231-243. <<https://doi.org/10.1080/00423114.1999.12063084>>.
- Violante, M. G. et E. Vezzetti. 2017. « Kano qualitative vs quantitative approaches: An assessment framework for products attributes analysis ». *Computers in Industry*, vol. 86, p. 15-25. <<https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.007>>.

- Wagner, S. 2014. « Scrum for cyber-physical systems: a process proposal ». *Proceedings of the 1st International Workshop on Rapid Continuous Software Engineering - RCoSE 2014*. p. 51-56. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/2593812.2593819>>.
- Waldrop, M. M. 2016. « More than Moore ». *Nature*, vol. 530, n° 7589, p. 144-147. <<https://doi.org/10.1038/530144a>>.
- Wan, J., A. Canedo et M. A. Al Faruque. 2017. « Functional Model-Based Design Methodology for Automotive Cyber-Physical Systems ». *IEEE Systems Journal*, vol. 11, n° 4, p. 2028-2039. <<https://doi.org/10.1109/JSYST.2014.2387487>>.
- Wang, J., Z. Fan, J. P. Terpenney et E. D. Goodman. 2005. « Knowledge interaction with genetic programming in mechatronic systems design using bond graphs ». *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 35, n° 2, p. 172-182. <<https://doi.org/10.1109/TSMCC.2004.841915>>.
- Wang, Y. 2018. « Resilience Quantification for Probabilistic Design of Cyber-Physical System Networks ». *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, vol. 4, n° 3, p. 1-12. <<https://doi.org/10.1115/1.4039148>>.
- Warniez, A., O. Penas et T. Soriano. 2012. « About metrics for integrated mechatronic system design ». *2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 13th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*. p. 450-457. IEEE. <<https://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2012.6451047>>.
- Weimer, J., R. Ivanov, S. Chen, A. Roederer, O. Sokolsky et I. Lee. 2018. « Parameter-Invariant Monitor Design for Cyber-Physical Systems ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 1, p. 71-92. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2723847>>.
- Weiser, M. 1991. « The Computer for the 21st Century ». *Scientific American*, September, p. 94-104.
- Weiser, M. 1999. « Some computer science issues in ubiquitous computing ». *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 3, n° 3, p. 12- 21. <<https://doi.org/10.1145/329124.329127>>.
- Whitmore, A., A. Agarwal et L. D. Xu. 2015. « The Internet of Things - A survey of topics and trends ». *Information Systems Frontiers*, vol. 17, n° 2, p. 261-274. <<https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>>.
- Wiener, N. 1965. *Cybernetics Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, 2nd éd. MIT Press.

- Wieringa, R. 2009. « Design Science as Nested Problem Solving ». *DESRIST '09: Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology*. p. 1- 12. <<https://doi.org/10.1145/1555619.1555630>>.
- Wieringa, R. 2014. *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering*. Springer Heidelberg. <<https://doi.org/10.1145/1810295.1810446>>.
- Wilmsen, M., K. Dühr et A. Albers. 2019. « A context-model for adapting design processes and methods ». *Procedia CIRP*, vol. 84, p. 428-433. <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.243>>.
- Wohlin, C. 2014. « Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering ». *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering - EASE '14*, p. 1-10. ACM Press. <<https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>>.
- Wrobel, J., J. Jezewski, K. Horoba, A. Pawlak, R. Czabanski, M. Jezewski et P. Porwik. 2015. « Medical Cyber-Physical System for Home Telecare of High-Risk Pregnancy: Design Challenges and Requirements ». *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, vol. 5, n° 6, p. 1295-1301. <<https://doi.org/10.1166/jmih.2015.1532>>.
- Wu, F. J., Y. F. Kao et Y. C. Tseng. 2011. « From wireless sensor networks towards cyber physical systems ». *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 7, n° 4, p. 397-413. <<https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2011.03.003>>.
- Wu, F. L., H. B. He et Y. M. Deng. 2012. « Applying Bond Graphs for Design Representation of Mechatronic Products ». *Applied Mechanics and Materials*, vol. 201-202, p. 537-540. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.201-202.537>>.
- Wu, J. C., M. C. Leu et X. F. Liu. 2009. « A hierarchical object-oriented functional modeling framework for co-design of mechatronic products ». *Concurrent Engineering Research and Applications*, vol. 17, n° 4, p. 245-256. <<https://doi.org/10.1177/1063293X09352120>>.
- Wynn, D. et J. Clarkson. 2005. « Models of designing ». *Design process improvement*, Clarkson, J. et C. Eckert, p. 34-59. London : Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-061-0_2>.
- Xu, L. D., W. He et S. Li. 2014. « Internet of things in industries: A survey ». *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, n° 4, p. 2233-2243. <<https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>>.

- Xu, Y. et H. Zou. 2007. « Design principles for mechatronic systems based on information content ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, n° 7, p. 1245-1254.
<<https://doi.org/10.1243/09544054JEM699>>.
- Yeh, T. M., F. Y. Pai et C. C. Yang. 2010. « Performance improvement in new product development with effective tools and techniques adoption for high-tech industries ». *Quality and Quantity*, vol. 44, n° 1, p. 131-152.
<<https://doi.org/10.1007/s11135-008-9186-7>>.
- Yuan, W., Y. Liu, J. Zhao et H. Wang. 2016. « Pattern-based integration of system optimization in mechatronic system design ». *Advances in Engineering Software*, vol. 98, p. 23-37. <<https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.03.005>>.
- Zhang, L. 2011a. « MDA approach for non-functional characteristics of cyber physical systems based on aspect-oriented method ». *Communications in Computer and Information Science*, vol. 215 p. 323-328. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23324-1_52>.
- Zhang, L. 2011b. « Aspect-oriented MDA approach for non-functional properties of distributed cyber physical systems ». *Proceedings - 2011 10th International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, DCABES 2011*, p. 284-288. <<https://doi.org/10.1109/DCABES.2011.26>>.
- Zheng, C. 2015. « Design and integration of multi-disciplinary interfaces : method and modelling language for mechatronic systems engineering ». Université de Technologie de Compiègne.
- Zheng, C., M. Bricogne, J. Le Duigou et B. Eynard. 2014. « Survey on mechatronic engineering: A focus on design methods and product models ». *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, n° 3, p. 241-257. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.05.003>>.
- Zheng, C., J. Le Duigou, M. Bricogne, P. Hehenberger et B. Eynard. 2016. « Multidisciplinary Interface Modelling: A Case Study on the Design of 3D Measurement System ». *Product Lifecycle Management in the Era of Internet of Things, PLM 2015, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Bouras A., B. Eynard, S. Foufou, K. D. Thoben, vol. 467, p. 856-866. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33111-9_78>.
- Zheng, C., P. Hehenberger, J. Le Duigou, M. Bricogne et B. Eynard. 2017. « Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model ». *Research in Engineering Design*, vol. 28, n° 3, p. 333-356.
<<https://doi.org/10.1007/s00163-016-0243-2>>.

- Zheng, C., X. Qin, B. Eynard, J. Li, J. Bai, Y. Zhang et S. Gomes. 2019. « Interface model-based configuration design of mechatronic systems for industrial manufacturing applications ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, p. 373-384. <<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.05.011>>.
- Zheng, P., X. Xu et C. H. Chen. 2018. « A data-driven cyber-physical approach for personalised smart, connected product co-development in a cloud-based environment ». *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 31, n° 1, p. 3-18. <<https://doi.org/10.1007/s10845-018-1430-y>>.
- Zhu, Q. et A. Sangiovanni-Vincentelli. 2018. « Codesign Methodologies and Tools for Cyber-Physical Systems ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 9, p. 1484-1500. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2864271>>.
- Zhu, Q., A. Sangiovanni-Vincentelli, S. Hu et X. Li. 2018. « Design Automation for Cyber-Physical Systems [Scanning the Issue] ». *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 9, p. 1479-1483. <<https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2865229>>.
- Zou, J. et Q. Du. 2013. « A functional reasoning cube model for conceptual design of mechatronic systems ». *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 59, n° 5, p. 323-332. <<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.757>>.

BIBLIOGRAPHIE

Publications dans des revues internationales avec comité de lecture

Guérineau J., M. Bricogne, L. Rivest, A. Durupt. « Organizing the fragmented landscape of multidisciplinary product development: a mapping of approaches, processes, methods and tools from the scientific literature ». Soumis dans *Research in Engineering Design* (Avril 2021).

Communications dans des conférences internationales avec actes et comité de lecture

Plateaux R., O. Penas, M. Bricogne, **J. Guérineau**, H. Rowson, K. Maquin. 2019. « A semantic dictionnary to support multidisciplinary design collaboration in an extended enterprise context ». REM2019, 23rd - 24th May 2019, Fh Upper Austria, Wels Campus. p. 1-8. <<https://doi.org/10.1109/REM.2019.8744114>>

Guérineau J., S. Kousay, M. Richrath, K. Paetzold, J. Montero. 2019. « Aspects of body metrics data management in the long term for the European fitness industry ». 22nd *International Conference on Engineering Design ICED2019*, 5th – 8th August 2019, Delft, The Netherlands. p. 2051-2060. <<https://doi.org/10.1017/dsi.2019.211>>

Guérineau J., L. Rivest, M. Bricogne, A. Durupt, B. Eynard. 2018. « Towards a design-method selection framework for multidisciplinary product development ». 15th *International Design Conference, DESIGN2018*, Dubrovnik, Croatia, May 2018. p. 2879-2890. <<https://doi.org/10.21278/idc.2018.0431>>

Guérineau J., C. Zheng, M. Bricogne, A. Durupt, L. Rivest, H. Rowson, B. Eynard. 2017. « Management of heterogeneous information for integrated design of multidisciplinary systems ». *Procedia CIRP*, vol. 60, p. 320-325. <<http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.020>>

Guérineau, J., L. Rivest, M. Bricogne et A. Durupt. 2016. « Agile and Project-planned methods in multidisciplinary product design ». *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries. PLM 2016. 13th IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Harik R., L. Rivest, A. Bernard, B. Eynard, A. Bouras. vol. 492, p. 108-118. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54660-5_11>.

Guérineau J., M. Bricogne, A. Durupt, L. Rivest. 2016. « Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology ». 2016 *11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Compiègne, France: IEEE; 2016, p. 314–320.
<<http://doi.org/10.1109/MECATRONICS.2016.7547161>>