



HAL
open science

De la PME/PMI manufacturière traditionnelle à l'entreprise mécatronique : étapes clés et proposition d'un référentiel mécatronique

Leonida Granon

► To cite this version:

Leonida Granon. De la PME/PMI manufacturière traditionnelle à l'entreprise mécatronique : étapes clés et proposition d'un référentiel mécatronique. Autre. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAA021 . tel-03793197

HAL Id: tel-03793197

<https://theses.hal.science/tel-03793197v1>

Submitted on 30 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : Sciences pour l'ingénieur

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Leonida GRANON

Thèse dirigée par **M. Laurent TABOUROT** et
codirigée par **Mme Pascale BALLAND**

préparée au sein du **Laboratoire SYMME**
dans **l'École Doctorale SISEO**

De la PME/PMI manufacturière traditionnelle à l'entreprise mécatronique : étapes clés et proposition d'un référentiel mécatronique

Thèse soutenue publiquement le **10 octobre 2017**,
devant le jury composé de :

M. Eric BONJOUR

Professeur, Université de Lorraine, (Rapporteur)

Mme Laurence CHERILLAT

Secrétaire générale d'ARTEMA, Paris (Examinatrice)

M. Georges HABCHI

Professeur, Université Savoie Mont Blanc (Président)

Mme Caroline HUSSLER

Professeur, Université Jean Moulin, Lyon 3 (Examinatrice)

M. Thierry SORIANO

Professeur, Université de Toulon, (Rapporteur)



REMERCIEMENTS

Par cette page de remerciements je souhaiterais montrer ma gratitude envers tous ceux qui ont rendu ce travail possible. Je remercie tout d'abord les professeurs Laurent Tabourot et Pascale Balland dont la confiance, le soutien, le suivi et la patience ont été essentiels dans la recherche et l'élaboration de ce rapport de thèse. Merci également à Laurence Chérillat, secrétaire générale d'Artema et les industriels au sein du groupe mécatronique qui ont accepté de travailler avec nous. Je pense tout particulièrement à Stéphane Chaperot de Poclain et Pierre Milhau de Coval qui ont accepté d'évaluer les métriques proposées.

Un grand merci également au professeur Rachel Bocquet et maître de conférences Sandra Dubouloz de l'IREGE pour leurs précieux commentaires au départ de la thèse. Un clin d'œil à Raphaël Dornier, maître de conférences, sans qui je n'aurais jamais pensé à m'engager dans un travail de thèse...

De même, je remercie les membres du laboratoire SYMME et IREGÉ et tous ceux qui m'ont consacré du temps et apporté leur expérience et contribué ainsi utilement à ma réflexion ; je pense ici tout particulièrement à El-Housseine El-Hamed de SUPMECA Paris, Amandine Dufaug du SYMME et Emilie Ruiz de l'IREGE.

Merci à mes jeunes collègues doctorants qui ont rendu mon séjour parmi eux très agréable et à l'accueil du personnel qui, dès mon premier jour à SYMME, a contribué à l'atmosphère accueillante du laboratoire.

Merci, enfin, à ma famille qui m'a soutenue malgré mes « absences d'esprit » pendant ces quatre dernières années. Ce travail leur est dédié.

A mes quatre GRANON : mon époux Joël, mes filles Amélie et Flavie et mon fils Yann.

Table des matières

Introduction.....	13
Terminologie mécatronique.....	13
Périmètre mécatronique	16
Ecosystème mécatronique	17
Le marché mécatronique.....	20
La mécatronique, une révolution en marche ?	21
Problématique globale et périmètre de recherche.....	24
Conclusion	26
Plan de thèse	26
1. Chapitre 1 - Comment définir un vadémécum d'entreprise mécatronique ?.	29
1.1. Introduction.....	29
1.2. Méthode de recherche.....	30
1.2.1. L'étude de cas.....	30
1.2.2. Design ou architecture de recherche	32
1.2.3. La phase du prétest	34
1.2.4. Recensement des entreprises mécatroniques	36
1.2.5. Population cible.....	37

1.2.6. Echantillonnage	41
1.3. L'étude exploratoire : l'identification des champions mécatroniques par la mise en évidence des paramètres visibles et distinctifs de la mécatronique	42
1.3.1. Détail des critères macroscopiques utilisés	48
1.3.2. Pondération des critères macroscopiques	52
1.4. Conclusion.....	66
2. Chapitre 2 - Quel type d'organisation est le plus à même de mettre en évidence la spécificité mécatronique ?	69
2.1. Introduction.....	69
2.1.1. La contraction de l'échantillon	70
2.1.2. Le concept du fit stratégique	72
2.2. Le concept de complexité organisationnelle.....	74
2.2.1. Evolution des formes organisationnelles dans le temps	74
2.3. Les types d'entreprises schématisées.....	78
2.3.1. Différentes structures, différents modèles d'affaires.....	82
2.3.2. Le modèle de l'organisation moderne et flexible utilisée pour évaluer les compétences organisationnelles de l'entreprise définie a priori comme mécatronique.....	83
2.4. Les entreprises à fort degré de maturité mécatronique s'apparentent-elles à ces modèles d'entreprise auparavant identifiés ?.....	85
2.4.1. La méthode utilisée pour opérationnaliser et instrumenter le méta-modèle de Mintzberg.....	87
2.4.2. Application aux 33 entreprises du panel.....	94

2.5. Conclusion.....	96
2.6. Lien entre organisation et produit	100
3. Chapitre 3 - Les entreprises à forte maturité mécatronique font des produits mécatroniques.....	103
3.1. Introduction.....	103
3.2. Deux spécificités des produits mécatroniques mises en exergue : leur fonctionnalité et leur caractère multi-physique	105
3.2.1. Le produit mécatronique, tel que qualitativement défini par la norme ..	105
3.2.2. Les courants de recherche relatifs à la dimension fonctionnelle en mécatronique.....	111
3.2.3. Les métriques pour quantifier la mécatronique.....	113
3.2.4. Synthèse d'une première expérimentation	117
3.2.5. La définition de l'indicateur d'intégration avec la prise en compte des définitions d'Ulrich	118
3.3. La définition d'un module fonctionnel	119
3.4. Proposition de trois métriques fonctionnelles, d'une méthode de calcul et leur application sur des produits.....	121
3.4.1. Définir l'environnement du produit.....	121
3.4.2. Lister les fonctions du produit.....	122
3.4.3. Lier environnement et fonctions.....	122
3.4.4. Réaliser le diagramme de flux fonctionnels	123
3.4.5. Construire un tableau d'incidence et appliquer les métriques proposées	126

3.5. Illustration sur deux produits industriels	137
3.5.1. La pompe hydraulique Poclain PW simple	137
3.5.2. Synthèse des indicateurs évalués sur la pompe PW	143
3.5.3. La pompe hydraulique Poclain PWe.....	143
3.5.4. Résumé sur la pompe Poclain PWe	148
3.5.5. Comparaison entre les deux pompes hydrauliques de Poclain	148
3.6. Mise en exergue de l'évolution du degré de mécatronicité des produits	149
3.7. Le lien entre les fonctions d'un produit et la formulation de l'offre	151
3.8. Conclusion.....	153
4. Chapitre 4 – Spécificités des processus des entreprises mécatroniques ...	156
4.1. Introduction.....	156
4.2. Le concept de validité pragmatique	157
4.3. Restitution synthétique des contenus des entretiens relatifs aux processus mécatroniques spécifiques à partir de ces cinq études de cas	159
4.4. Les processus pour réussir dans le domaine de la mécatronique	159
4.4.1. La conception mécatronique	160
4.4.2. Les réseaux mécatroniques.....	161
4.4.3. L'approche des marchés et clients mécatroniques	162
4.4.4. Les équipements productifs et la qualification des fournisseurs	163
4.4.5. La gestion des RH et des connaissances	163
4.4.6. L'innovation ouverte.....	164

4.5. Synthèse des entretiens	165
4.6. Le changement de modèles d'affaires et les concepts sous-jacents ...	169
4.7. L'évaluation de la capacité à évoluer vers la mécatronique	178
4.8. Méthode de calcul et affichage du diagnostic.....	182
4.8.1. Généralités.....	182
4.8.2. Le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique (IMM).....	185
4.9. Conclusion.....	189
Conclusion générale.....	191
Référentiel mécatronique spécifique	192
Référentiel mécatronique générique	193
Limites.....	195
Bibliographie.....	196
Annexes	212
Annexe 1 - Extrait du fichier Excel pour l'affichage des activités des entreprises à forte activité mécatronique	212
Annexe 2 - Les 5 configurations organisationnelles de Mintzberg	213
Annexe 3.....	215
3.1. Le concept d'entreprise moderne et flexible	215
3.2. La théorie de complémentarité des ressources.....	216
3.3. Représentation élargie de l'entreprise moderne et flexible : son système productif, managérial et stratégique, adapté de Milgrom et Roberts	219

Annexe 4 - Postulat de la théorie des configurations organisationnelles de Mintzberg	221
4.1. Les caractéristiques des 5 structures organisationnelles types	221
4.2. Les composantes de base de l'organisation.....	221
4.3. Les paramètres de structuration (9 repartis en 4 groupes).....	225
4.4. Facteurs de contingence	227
Annexe 5 - Une revue de littérature relative au concept de l'innovation.....	228
Annexe 6 - Le concept d'ambidextrie plus en détail	232
Annexe 7 - Le concept de capacités dynamiques plus en détail	233
Annexe 8 - Concepts sous-jacents utilisés pour l'opérationnalisation du méta-modèle de Mintzberg.....	235
8.1. Recherche de l'exhaustivité.....	235
8.1.1. Concept de configurations organisationnelles	235
8.1.2. Concept de modèle économique (pour construire un business plan)	235
8.1.3. Concept de rupture technologique.....	236
8.1.4. Modèle d'entreprise moderne et flexible (plus en détail en Annexe 3) ...	236
8.1.5. La théorie d'innovation ouverte	236
8.1.6. Concept de capacités dynamiques (plus en détail Annexe 7)	237
8.1.7. Concept sociotechnique	237
8.1.8. La complexité organisationnelle	237
8.1.9. La gestion de l'incertitude.....	237
8.1.10. Rationalité complète et incomplète.....	238

8.1.11. Typologie de l'environnement.....	238
8.2. Types de technologies	240
8.2.1. Technologies à lien long.....	240
8.2.2. Technologies médiatrices.....	240
8.2.3. Technologies intensives	240
8.3. Types de coordination par rapport au type de technologie et leur gestion	241
8.3.1. Interdépendance séquentielle	241
8.3.2. Interdépendance en commun.....	241
8.3.3. Interdépendance réciproque.....	241
8.3.4. Concept de rupture technologique.....	241
8.4. Le concept d'organisation organique ou dynamique et interactive	243
8.5. Le concept d'innovation ouverte.....	245
8.6. Le concept d'iconomie (d'intelligence économique ou flux d'information)	247
Annexe 9	249
9.1. Les radars de 8 modèles d'entreprise théoriques.....	249
9.2. Opérationnalisation du méta-modèle de Mintzberg	254
9.2.1. Contenus agrégés pour résulter en Attributs de Mintzberg et Eléments de Contingence	254
Annexe 10	270
10.1. Grande pratique n° 1 : Recherche et développement en mécatronique : les entreprises mécatroniques font des produits mécatroniques	270
10.1.1. Sous-pratique n° 1 : Conception de produits mécatroniques.....	270

10.1.2.	Sous-pratique n° 2 : Outils de modélisation multi-physique adaptés à la mécatronique.....	271
10.1.3.	Sous-pratique n° 3 : Support 1 : Management de compétences mécatroniques.....	272
10.1.4.	Sous-pratique n° 4 : Support 2 : Management de projets mécatroniques.....	273
10.1.5.	Sous-pratique n° 5 : Support 3 : Marketing stratégique mécatronique 274	
10.1.6.	Sous-pratique n°4 : Support : Outils de créativité mécatronique	275
10.2.	Grande pratique n° 2 : Veille en mécatronique.....	276
10.2.1.	Sous-pratique n° 1 : Réseaux mécatroniques	276
10.2.2.	Sous-pratique n° 2 : Outils de veille mécatroniques	278
10.3.	Grande pratique n° 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques).....	278
10.3.1.	Sous-pratique n° 1 : Entité marketing dédiée à la mécatronique	279
10.3.2.	Sous-pratique n° 2 : Achats et vente adaptées à la mécatronique ...	280
10.3.3.	Sous-pratique n° 3 : Outils de marketing adaptés à la mécatronique 281	
10.3.4.	Sous-pratique n° 4 : Support : Formations mécatroniques	282
10.4.	Grande pratique n° 4 : Industrialisation en mécatronique	283
10.4.1.	Sous-pratique n° 1 : Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique.....	284
10.4.2.	Sous-pratique n° 2 : Outils PLM	284

10.4.3. Sous-pratique n° 3 : Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)	285
10.5. Grande pratique n° 5 : Méthodes en mécatronique.....	286
10.5.1. Sous-pratique n° 1 : Méthodes et tests de qualité mécatroniques....	286
10.5.2. Sous-pratique n° 2 : Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique	288
10.5.3. Sous-pratique n° 3 : Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique	289
10.6. Grande pratique n° 6 : Innovation Ouverte en mécatronique	290
10.6.1. Sous-pratique n° 1 : Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers.....	290
10.6.2. Sous-pratique n° 2 : Intégration des clients	291
Annexe 11 - Tableaux contenant le classement de 33 entreprises par degré de maturité mécatronique et la forme organisationnelle qu'elles présentent.....	293
Annexe 12 - Définitions extraites de la norme NF EN 16271 du Management par la valeur (AFNOR 2013) et retenues pour l'étude de la mécatronique	298
Annexe 13 - La liste des autres métriques proposées.....	300
13.1. Indicateur de communication totale ComMax.....	300
13.2. Indicateur de miniaturisation.....	301
13.3. Indicateur de recyclabilité	302
13.4. Indicateur d'économie d'énergie.....	304

Introduction

L'objectif général de cette recherche est l'identification des caractéristiques particulières d'organisations qui sont capables de concevoir des produits complexes et qui relèvent a priori d'une catégorie spécifique : les entreprises « mécatroniques ». Cette étude propose d'une part des métriques destinées à l'évaluation des solutions technologiques adoptées pour répondre aux besoins fonctionnels des produits mécatroniques et d'autre part identifie les processus nécessaires à leur réalisation. Elle vise à identifier et populariser un référentiel organisationnel de la mécatronique pour les entreprises en s'appuyant sur les canons d'organisation communs déjà adoptés par les entreprises qui ont une activité reconnue dans le domaine de la mécatronique. Ce référentiel est donc pensé comme un outil pour les PME (Petites et Moyennes Entreprises) facilitant la mise en place de stratégies pour accéder au prometteur marché des produits mécatroniques.

Il convient de préciser que le terme mécatronique est un néologisme apparu pour la première fois en 1969. Il a été introduit par le cadre Tetsuro Mori de la société japonaise Yaskawa Electric Corporation, fabricante de composants et systèmes d'automatisme. Ce terme répond au besoin de définir une activité industrielle de développement de produits hybrides qui intègrent de façon poussée et jusque-là inédite, des technologies utilisées plutôt séparément jusqu'alors.

Terminologie mécatronique

En tant que nom, le mot mécatronique définit l'ingénierie de conception visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité.

S'il est employé comme un adjectif, il est souvent associé à un produit présentant un niveau complet et élevé d'intégration technologique et ayant simultanément la

capacité de percevoir son milieu environnant, de traiter l'information, de communiquer et d'agir sur son milieu. Il est alors mécatronique ou mécatronisé.

Le néologisme, dérivé de mécatronique, mécatronicité désigne quant à lui, à quel point un produit ou une organisation est mécatronique. Un glossaire est proposé dans le Tableau 1.

	Terme	Définition	Sources
Mécatronique en tant que nom	La mécatronique	<i>Nom féminin de méca (nique) et de (élec)tronique. Technique industrielle consistant à utiliser simultanément et en symbiose la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique pour la conception et la fabrication de nouveaux produits.</i>	Larousse (www.larousse.fr)
	La mécatronique	<i>Démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité.</i>	Norme Afnor NF 01 010 (2008)
Mécatronique en tant qu'adjectif	Processus mécatronique	<i>Relatif au cycle de vie des produits mécatroniques, la démarche mécatronique qui permet d'obtenir des performances supérieures aux solutions traditionnelles, de réaliser de nouvelles fonctionnalités et de rendre les produits mécatroniques plus</i>	Norme Afnor XP E 01 013 (2009) – actuellement annulée

	Terme	Définition	Sources
		<i>compacts, nécessite la mise en place d'une approche coopérative interdisciplinaire.</i>	
	Mécatronicien(- nne)	<i>Nom m. et f. désignant le métier exercé : « Au carrefour de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique, le mécatronicien crée des ensembles automatisés miniaturisés. Les applications sont très nombreuses et les secteurs qui recrutent variés, de l'automobile à la défense ».</i>	http://www.education.gouv.fr/ L'info nationale et régionale sur les métiers et les formations : http://www.onisep.fr/
	Mécatronique Mécatronisé	<i>Adjectif pour désigner un produit, un département ou une filière mécatronique ; un produit mécatronisé.</i>	www.techniques-ingenieur.fr
Mécatronicité	Mécatronicité Degré de mécatronicité	<i>Nom et complément de nom pour désigner l'intensité d'intégration mécatronique d'un produit ou d'une entreprise.</i>	Création de néologisme par SYMME

Tableau 1 : Définitions et utilisations dérivées du terme mécatronique

Dans un souci de création d'un langage commun et avec pour motivation une standardisation de plus en plus poussée, deux normes françaises NF 01 010 (AFNOR 2008) et XP E 01 013 (AFNOR 2009) précisent d'une part la terminologie relative à la mécatronique et d'autre part le cycle de vie des produits mécatroniques. Il n'y a pas eu de normes supplémentaires et la norme expérimentale XP E 01 013 apparaît comme annulée sur le site de l'AFNOR.

Dans la suite de ce travail, le terme mécatronique sera utilisé dans les sens donnés dans le Tableau 1.

Périmètre mécatronique

Le courant mécatronique qui vise à concevoir et fabriquer des produits intégrés a continué à se développer à un point tel que de nos jours, le périmètre de la mécatronique recouvre beaucoup de nos objets quotidiens ou industriels et englobe par exemple le développement de l'internet des Objets (Ajah et al. 2015) ou encore celui des systèmes cyber-physiques (Sanislav and Miclea 2012). L'internet des Objets a été identifié comme un secteur à très forte croissance¹ dans un futur à très court terme. En effet, ces produits d'utilisation courante offrent un spectre de services fonctionnels très large. Pourtant tel n'était pas le cas il y a quelques années encore lorsque les téléphones ne remplissaient qu'une seule fonction, la communication notamment, et les montres ne donnaient que l'heure. Contrairement à leurs ancêtres, les appareils d'aujourd'hui sont d'apparence simple, souvent élégants et discrets, de petite taille et pratiques à l'utilisation. A titre d'illustration, ils permettent de piloter les installations de domotique de notre maison, d'exercer un contrôle à distance de notre chauffage et de les suivre, ainsi que les consommations courantes, par le biais d'un téléphone dit intelligent. Ces produits nous permettent de nous positionner (par le biais d'un capteur GPS), de nous orienter (à l'aide de capteurs magnétiques), d'effectuer des accélérations (par le biais d'accéléromètres) mais également de produire des sons (haut-parleurs), d'enregistrer (à l'aide des micros), de prendre des photos (à l'aide de capteurs photographiques ccd), de produire des images (avec des écrans actifs), de détecter des contacts (par le biais d'écrans tactiles), pour n'en citer que quelques-uns.

La représentation d'un produit mécatronique se trouve dans la Figure 1.

¹ L'accroissement de 90% du chiffre d'affaires en 2016 pour le groupe **Kerlink** (ALKLK - FR0013156007), spécialiste des réseaux et solutions dédiés à l'internet des objets et les prévisions pour 2017 sont encore plus encourageantes. Source :<https://www.lerevenu.com/breves/communique-de-presse-kerlink-lancement-de-laugmentation-de-capital>

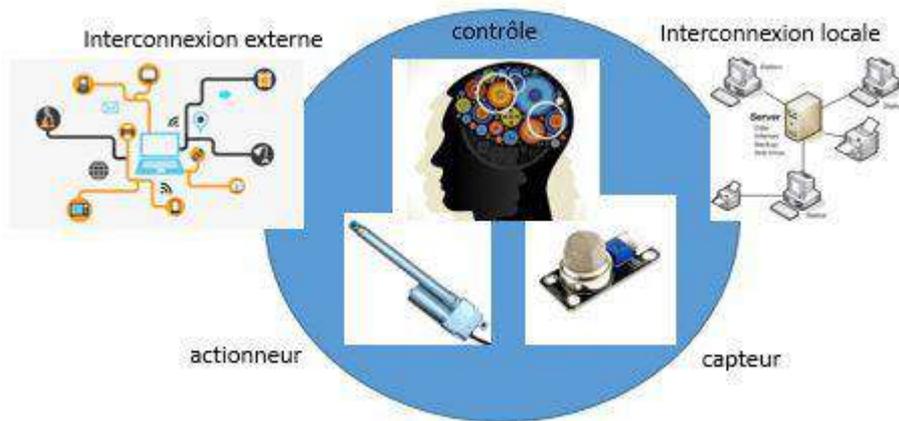


Figure 1 : Un exemple schématisé du produit mécatronique interconnecté Sources: Captronic, Artema

La conception et la fabrication de ces produits nécessitent des couplages multi-physiques et le recours aux spécialistes venant de différents domaines comme l'électronique et l'informatique en plus de la mécanique est donc inévitable.

Ecosystème mécatronique

L'écosystème de la mécatronique se développe depuis la fin des années 90. Au fil du temps, il se consolide attestant de la réalité de l'activité mécatronique sans toutefois que la mécatronique soit elle-même encore très précisément définie.

Cet écosystème et la présence d'entreprises qui se revendiquent mécatroniques attestent de la réalité et du dynamisme d'un monde mécatronique qu'il convient de mieux définir. Un aperçu de cet écosystème est donné relativement aux parties prenantes de ce travail de thèse.

Le syndicat français de la mécatronique Artema a été créé en 2007 par fusion de la MHP (Association des roulements et de l'étanchéité), de l'UNITOP (Syndicat des transmissions oléo hydrauliques et pneumatiques) et de l'UNITRAM (Syndicat des

transmissions mécaniques)²². Artema est ainsi l'organisation de référence pour ces professions. Le syndicat compte environ 150 adhérents, PME (Petite et Moyenne Entreprise), ETI (Entreprise de Taille Intermédiaire) et groupes internationaux qui assurent 35 000 emplois en France. En 2008, il y a eu création du groupe mécatronique en son sein et en 2015, une 9^{ème} profession, les fixations (AFFIX), a rejoint les huit professions précédemment représentées que sont : éléments de transmission mécanique, étanchéité industrielle, maintenance et services, mécatronique, réducteurs et engrenages, roulements et guidages linéaires, transmissions hydrauliques, transmissions et automatismes pneumatiques. Toutes ces professions regroupées au sein d'Artema représentent 80% de la production française et 70% du marché français. Le chiffre d'affaires des membres du syndicat s'élève à plus de 7,2 milliards d'euros, dont 50% à l'exportation (soit 10 points de plus que la Mécanique) (Artema 2016).

En 2000, il y a eu création de Thésame. Ce réseau technologique pour les entreprises a été pensé comme un projet mixte privé - public, qui en même temps intègre la recherche, l'industrie et la stratégie territoriale. Trois entreprises du secteur privé de taille intermédiaire (ETI) ont été fortement impliquées au démarrage : NTN-SNR, SEB-TEFAL et SOMFY. Ensuite, elles ont été rapidement rejointes par d'autres. Le secteur public est représenté par des collectivités territoriales du département de Haute-Savoie, de la Région Rhône-Alpes, de l'agglomération d'Annecy et de l'Etat en Région qui ont uni leurs forces pour donner à la structure les moyens de se développer en s'appuyant sur plus de 500 experts, consultants professionnels du secteur privé ou spécialistes issus de centres de compétences scientifiques publics de premier niveau, notamment : laboratoires de recherche de l'Université de Savoie (devenue Université Savoie Mont Blanc), centres techniques du CETIM-CTDEC et CETIM, MIND électronique ou encore l'Observatoire Stratégique de la Sous-Traitance (OSST). Aujourd'hui, Thésame accompagne les entreprises pour les faire gagner en maturité, avec un budget de 2,7 M€. Il est devenu un acteur référent de l'innovation avec une focalisation sur l'accompagnement des petites et moyennes entreprises et entreprises de taille intermédiaire. Aujourd'hui ses grands domaines d'intervention sont la

²² La MHP, l'UNITOP et l'UNITRAM avaient été créés dans les années 1950.

mécatronique/robotique, le management de l'innovation et la performance industrielle (Thésame 2017).

Thésame est également membre fondateur du pôle de compétitivité Arve Industries créé en 2006 et devenu pôle Mont-Blanc Industries en 2013 dont le but premier a été d'amener les entreprises sur un chemin de croissance. Ses deux projets fondateurs, financés à l'aide d'un fonds unique interministériel (FUI), ont été : (1) la machine auto-adaptative, un projet qui vise à optimiser les paramètres d'usinage et (2) le capteur autonome communiquant, un projet majeur d'innovation mécatronique, en collaboration avec le CETIM-CETEDDEC et l'Université Savoie Mont Blanc. Aujourd'hui, il explore des leviers de la performance comme l'optimisation des flux avec l'introduction du Lean dans les entreprises et propose des dispositifs financiers innovants comme le prêt à taux 0% et le lancement du fonds Arve Industries Capital, avec deux partenaires bancaires. Il veille au partage de bonnes pratiques et décerne un label d'excellence aux entreprises les plus performantes. En dix ans, le nombre d'adhérents a triplé et en 2012, le pôle Mont-Blanc Industries a été classé dans les top 20 des pôles français les plus performants. Il dispose d'une aide financière de 140 M€ provenant du fonds unique interministériel (FUI) qu'il projette d'investir dans les compétences et technologies nécessaires à l'industrie du futur (Mont-Blanc Industries 2006).

De même, il y a eu création, en 2006, du laboratoire SYMME (Systèmes et Matériaux pour la MEcatronique), équipe d'accueil de l'Université Savoie Mont Blanc (EA n°4144), qui développe des méthodes innovantes propres à la conception de systèmes mécatroniques et des processus de management. Les activités du laboratoire sont en grande partie tournées vers l'innovation pour la santé et vers l'innovation industrielle. SYMME est par ailleurs organisé pour avoir une vue d'ensemble sur la valeur ajoutée du produit et peut ainsi envisager l'optimisation globale de la chaîne de valeur d'un produit et s'interface fortement avec les industriels français. Il s'appuie sur un effectif de 80 personnes et inscrit entre 25 à 30 doctorants par an avec une production annuelle de 8 à 10 thèses en moyenne (rapport d'activités SYMME janvier 2014 - avril 2017). Il dispose d'un budget annuel entre 900 k€ et 1,5 M€ pouvant aller jusqu'à 1,8 M€ (hors salaires des personnels permanents) en comprenant des contrats industriels, des contrats nationaux (ANR, FUI...) et régionaux (Rhône-Alpes) publics,

mais aussi internationaux (FP7, INTERREG). Le laboratoire SYMME développe de larges partenariats académiques avec des laboratoires nationaux et étrangers (Algérie, Canada, Irlande, Norvège, Suisse), avec les pôles de compétitivité (Mont Blanc Industries, Plastipolis et Minalogic) et les réseaux technologiques pour les entreprises (Thésame, Savoie Technolac...). Par ailleurs, SYMME est à l'origine du projet d'Institut Technologique Mécatronique Européen : E-TIME qui se conçoit comme une plateforme de mutualisation de compétences et de moyens humains et matériels dans le domaine des innovations mécatroniques.

Le développement de tous ces organismes qui se sont donnés pour mission, entre autres, de faire évoluer le secteur historique du décolletage à la mécatronique montre, que les enjeux industriels liés à la mécatronique sont importants.

Le marché mécatronique

La mécatronique est également promue comme une technologie qui permet de réduire les coûts et d'augmenter la valeur ajoutée du produit par le biais de l'augmentation de sa fonctionnalité. Cela permet d'élargir le champ de clients potentiels et donc l'accès aux différents marchés (Artema 2016) (Thésame 2017). Ces mêmes propos sont repérables dans les rapports des organismes internationaux tels que l'OCDE³ (Polt and Ohler 1995), c'est pourquoi de nombreux groupes de travail se forment et des études sont menées par différents organismes en France également. A titre d'exemple, la Chambre de Commerce et d'Industrie des Alpes Maritimes (CCI Alpes Maritimes 2013) s'est donnée pour objectif d'établir un premier atlas de compétences mécatroniques en France et il est également pressenti par de nombreux experts que les produits mécatroniques permettent de redessiner les modèles d'affaires des entreprises. Plusieurs études confirment aujourd'hui que la mécatronique est une dynamique porteuse et en constante progression.

³ Organisation de Coopération et de Développement Economique

Au niveau de l'Union Européenne, la part mécatronique dans les produits industriels a été estimée en 2011 de 10 à 15% par le Centre Technique des Industries Mécaniques, ce qui en valeur marchande représentait 10 milliards d'€ (Cetim 2011). Ces données se sont avérées justes puisqu'en 2015, le syndicat de la mécatronique en France, Artema, a évalué le volume d'affaires à 7,4 milliards d'€ pour le seul marché français. Des données plus récentes encore parlent de 27% d'augmentation du marché mondial de la robotique pour l'année 2014 (Thésame 2017) et la reprise du marché automobile européen est enfin au rendez-vous (ACEA 2016). En 2020, « 420 millions d'automobiles connectés généreront un marché de connectivité de 9 milliards d'€ » (Ropert 2016). A titre d'exemple on peut parler de la voiture connectée Peugeot Instinct Concept (Peugeot 2017) présentée au salon international de Genève en mars 2017. Par ailleurs, 42 milliards d'objets connectés étaient en circulation en 2015 dont le marché futur est estimé à 155 milliards pour 2025 (iDate Forum 2015). L'initiative de l'entreprise Bosch Rexroth va en ce sens : ils ont créé leur propre cloud et lancé 50 applications pour leurs objets connectés en 2016 (Bosch 2016). La maison connectée est l'un des secteurs les plus prometteurs ; le nombre d'objets connectés de la Smart Home va passer de 200 à 900 millions entre 2015 et 2025 (Ramahandry 2016). Désormais, tous les secteurs d'activité s'empressent d'entrer en relation avec leurs clients via les plateformes internet. Les secteurs de la santé, de la domotique - la maison intelligente n'est que sa version connectée - ainsi que le marché de l'internet industriel avec des machines interconnectées M2M (machine à machine), sont tout particulièrement concernés. Pour couronner le tout, la ville connectée, rêvée au siècle dernier devient aujourd'hui une réalité (iDate Forum 2016). En 2014, 50% des villes de plus de 100 000 habitants se sont lancées dans le développement de la Smart City caractérisée par des services publics numériques, de l'e-administration et des transports collectifs autonomes (ARUCO 2014).

La mécatronique, une révolution en marche ?

Certains auteurs académiques (Hermann, Pentek, and Otto 2015) appréhendent la mécatronique d'une façon plus large encore : selon eux, la quatrième révolution technologique est en route comme montré dans le Tableau 2.

Première révolution technologique	Deuxième révolution technologique	Troisième révolution technologique	Quatrième révolution technologique
2 ^{ème} moitié du 18 siècle avec l'avènement de la production mécanique	1870 l'électrification et la division de travail Taylorienne	1970 révolution numérique	2011 Industrie 4,0

Tableau 2 : Les 4 révolutions technologiques

Cette quatrième révolution technologique est portée par l'Industrie 4.0 définie ainsi par des représentants européens du monde des affaires, de la politique et des académiciens (Kagermann; Henning 2014), qui ont promu l'idée de Industrie 4.0 comme une approche pour consolider la position concurrentielle de l'Allemagne en 2011. L'Industrie 4.0 est définie comme un terme générique pour désigner les technologies et l'organisation de la chaîne de valeurs autour de quatre composantes ou piliers que sont les systèmes cyber physiques, l'internet des objets, l'internet des services et la smart factory ou l'usine connectée. L'industrie 4.0 s'appuie sur six principes architecturaux qui sont l'interopérabilité (homme-machine ou machine-machine), la dématérialisation, la décentralisation, la capacité de réponse en temps réel, l'orientation services et la modularité. Ces principes et leur application aux piliers susmentionnés sont présentés dans le Tableau 3, repris et adaptés de (Hermann et al. 2015).

4 piliers 6 principes	Systèmes cyber physiques	Internet des objets	Internet des services	Usine connectée
L'interopérabilité	X	X	x	X
Dématérialisation	X	-	-	X
Décentralisation	X	-	-	X
Capacité de réponse en temps réel	-	-	-	X

4 piliers 6 principes	Systèmes cyber physiques	Internet des objets	Internet des services	Usine connectée
Orientation services	-	-	x	-
Modularité	-	-	X	-

Tableau 3 : Principes architecturaux pour les 4 composantes de l'Industrie 4.0, adaptés de (Hermann et al. 2015)

Des études menées en Allemagne (Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster 2013) amènent des propositions pour réussir au mieux le passage de la production et de services aujourd'hui encore faiblement connectés à l'Industrie 4.0. Depuis, le concept a été largement adopté par d'autres pays européens.

En France, ce concept a été nuancé et élargi à d'autres thématiques. A savoir, si l'industrie 4.0 décrit la numérisation de tous les secteurs industriels et la Smart factory les processus de fabrication et les chaînes de production numérisées, le concept de l'Usine du futur adopté en France se veut d'apporter des réponses à plusieurs transitions simultanées et notamment numérique, bien entendu mais également énergétique, écologique, organisationnelle et sociétale (Fédération des Industries Mécaniques (FIM) 2015). En d'autres mots, elle travaille sur les solutions pour instrumenter la production Smart factory et met l'humain au centre de ses préoccupations.

D'une façon générale, quelque 140 milliards d'euros devraient être investis chaque année dans les solutions Industrie 4.0, d'ici 2020 par l'industrie européenne, selon les estimations de PwC « Industry 4.0-Opportunities and Challenges of the Industrial Internet » (PwC 2016).

La mécatronique, quant à elle, est étudiée sous plusieurs angles de vue : les aspects de développement d'ontologies pour l'ingénierie collaborative sont étudiés par (Damjanović et al. 2007) et touchent également à l'enseignement transdisciplinaire avec (Pop and Măties 2011), soulignant la nécessité de la formation professionnelle

tout au long d'un parcours mécatronique et les méthodes spécifiques de résolution de problèmes comme leviers de réussite (Pop and Măties 2010). Les objets connectés⁴, (Benghozi et al. 2012), (Ajah et al. 2015) ou encore les systèmes dits cyber-physiques (Sanislav and Miclea 2012) qui s'intègrent dans les systèmes physiques présentent également une partie importante des recherches ainsi que la fiabilité des systèmes mécatroniques (Demri 2010) et (Hammouda et al. 2013). Un autre courant encore concerne les métriques pour la modélisation des processus de conception mécatroniques (Bonjour 2008), (Bonjour et al. 2009), pour faciliter l'évaluation d'architectures en ingénierie système (Lô 2013), pour la mise en place des processus agiles dans les phases de conception préliminaire (Bricogne 2014) ou encore pour instrumenter le métier d'architecte de systèmes mécatroniques (Turki 2008), (Bonjour 2008), (Bonjour and Micaëlli 2010), (Bonjour, Deniaud, and Micaëlli 2013) et (Warniez 2015).

La mécatronique est donc essentielle à l'industrie du futur et par conséquent à l'usine du futur, puisque sans mécatronique il n'y aurait pas d'intelligence ou de connectivité entre les machines. De plus, les entreprises fournissent aussi bien qu'utilisent des solutions technologiques mécatroniques. Il est donc opportun d'étudier comment s'organisent les entreprises qui produisent et commercialisent ces produits. Encore faut-il trouver une population d'entreprises qui permette un ciblage concret et précis.

Problématique globale et périmètre de recherche

Un nombre croissant d'entreprises commencent à se revendiquer mécatroniques, alors que le concept d'une telle entreprise n'est ni bien défini, ni labellisé. L'augmentation et l'optimisation des fonctionnalités des produits mécatroniques requiert le concours de plusieurs disciplines et l'aspect collaboratif est alors une

⁴ "A network of networks enabling, through unified and normalized electronic identification systems, along with wireless mobile devices, to identify directly and without ambiguity digital entities and physical objects, thus making possible to retrieve, save, transfer and treat, with no discontinuity between the physical world and the digital world, associated data."

condition nécessaire. A savoir, il faut faire travailler ensemble des spécialistes de plusieurs métiers différents.

Compte-tenu des prévisions de croissance économique en matière mécatronique, de nombreuses PME et PMI manufacturières de filière du décolletage et de l'emboutissage du secteur de la sous-traitance seront amenées à développer à très court terme des activités industrielles relevant de l'ingénierie mécatronique. Ces entreprises devront être en mesure de répondre aux besoins en composants évolués de leurs donneurs d'ordre qui ont déjà pris la voie de la mécatronique en tant que pionniers tout d'abord, puis en tant que leaders de la mécatronique actuellement. Elles vont donc être conduites à adopter une organisation et des processus qui leur permettront d'aboutir à la production de produits mécatroniques pour s'intégrer dans la dynamique économique provoquée par le développement de ces systèmes hautement intégrés technologiquement. Il s'agira alors pour ces PME d'être "qualifiées" en tant que fournisseur mécatronique vis-à-vis de leur donneur d'ordre. Si les grands groupes et la plupart des entreprises de tailles intermédiaires ont déjà mis en place une organisation et des processus spécifiques qui ont permis la réalisation de produits mécatroniques emblématiques à grande diffusion (roulement instrumenté par exemple), cette tendance n'est pas généralisée pour la grande majorité des PME. Par ailleurs, les processus des entreprises de grande taille ne sont pas forcément transposables directement aux petites entreprises compte tenu de nombreuses différences d'organisation et de disponibilité des ressources. Il n'est donc pas possible d'envisager un transfert direct et rapide de l'expérience du donneur d'ordre vers son sous-traitant.

Cette étude est menée dans la perspective de fournir des outils supports aux PME envisageant d'évoluer d'une activité sectorielle mono-domaine vers une activité mécatronique multi-domaines. Elle est soutenue à la fois par l'Assemblée des Pays de Savoie et par le Fonds pour l'Innovation dans l'Industrie (F2I) de l'Union des Industries et Métiers de la Métallurgie (UIMM). Elle s'effectue sous l'égide du groupe de travail mécatronique du syndicat des industriels de la mécatronique Artema et est réalisée au sein du laboratoire SYMME de l'Université Savoie Mont Blanc.

Conclusion

Pour résumer la partie précédente, cette recherche vise à identifier et populariser un référentiel organisationnel de la mécatronique pour les entreprises. Le principe de l'étude est d'ébaucher ce référentiel en s'appuyant sur les canons d'organisation communs identifiables et adoptés par les entreprises qui ont déjà une activité notable dans le domaine de la mécatronique.

Dans ce contexte, la question qui se pose aujourd'hui à la PME traditionnelle de filière n'ayant pas encore pris le virage de la mécatronique est d'identifier quelle est l'organisation optimale à mettre en place pour supporter les processus de conception de produits définis comme mécatroniques. Les PME, peu nombreuses encore, qui ont intégré des processus de développement mécatroniques et qui ont acquis une maturité certaine dans ce domaine ont amorcé cette mutation il y a une dizaine d'années déjà. Si cela permet d'avoir un premier retour d'expériences en analysant les modes de fonctionnements de ces champions mécatroniques, il n'existe cependant pas de vadémécum de l'entreprise mécatronique sur lequel pourraient s'appuyer les entreprises qui ne le sont pas. Les normes au sujet de la mécatronique, citées plus haut, sont essentiellement qualitatives et ne contiennent pas d'éléments organisationnels sur lesquels s'appuyer de façon pragmatique pour définir une feuille de route concrète afin d'opérer cette conversion.

Plan de thèse

Dans cette introduction, la problématique et le périmètre de recherche globaux ont été exposés, à savoir, la volonté de définir les canons d'une entreprise qui fait de la mécatronique et de fournir aux PME ou PMI⁵ mono-domaine des outils opérationnels pour qu'elles puissent se positionner par rapport aux marchés mécatroniques multi-domaines et élaborer des stratégies pour y accéder.

⁵ PMI : Petite Moyenne Entreprise Industrielle

Le rapport est composé de 4 chapitres suivis d'une partie discussion, dans laquelle des préconisations sont proposées à l'organisation qui souhaite opérer des changements au niveau des compétences, des méthodes et des outils pour devenir mécatronique. Suivent ensuite la bibliographie et les annexes contenant les détails qu'il a été jugé utiles de partager.

Le Chapitre 1 explique la méthode adoptée, rend compte de l'étude exploratoire et positionne la recherche. Dans cette partie, il s'agit surtout d'identifier les entreprises mécatroniques et de déterminer comment elles se positionnent sur ce marché sur la base de critères premièrement retenus pour définir une maturité mécatronique.

Le Chapitre 2 restitue l'étude effectuée pour 33 entreprises identifiées et permet d'apporter des éclairages supplémentaires organisationnels par l'instrumentation d'un cadre d'évaluation d'entreprise textuel existant. Ces éclairages ainsi obtenus sur l'entreprise qui fait de la mécatronique, restent toutefois génériques et ce chapitre sert à repositionner la recherche à un niveau plus spécifiquement « métier » qui est ensuite traité dans le chapitre suivant.

Au Chapitre 3, le produit est placé au cœur de la problématique pour définir « une entreprise ayant atteint un degré important de maturité en mécatronique » et pour établir un lien entre l'organisation et le produit qui la définit. En partant de l'analyse fonctionnelle des produits, des métriques spécifiques d'intégration fonctionnelle sont proposées et appliquées sur deux exemples industriels et le lien entre le degré de mécatronicité des produits et la possibilité de changement de modèle d'affaires en partant de produits est établi.

Le Chapitre 4 élargit le lien entre le degré de mécatronicité du produit et les choix organisationnels possibles. Une méthode reproductible est proposée pour permettre à tout candidat à la mécatronique de se positionner par rapport aux marchés mécatroniques multi-domaines et d'élaborer des stratégies pour y accéder.

Enfin, la conclusion rend compte des opérateurs de transformation d'une entreprise pour qu'elle converge vers l'entreprise de type mécatronique. On y formule des préconisations concrètes pour toute PMI qui souhaiterait formuler sa stratégie par rapport à la mécatronique et organiser ses activités. Une discussion est également

proposée sur les perspectives de recherche futures et les évolutions possibles de la mécatronique.

1. Chapitre 1 - Comment définir un vadémécum d'entreprise mécatronique ?

1.1. Introduction

Ce Chapitre 1 explique la méthode et rend compte de l'étude exploratoire du départ. Dans cette partie, il s'agit surtout d'identifier les entreprises mécatroniques et de déterminer comment elles se positionnent sur ce marché. On propose un design ou architecture de recherche schématisé qui permet de relier chaque partie de ce document au contexte global. La méthode supportée par le design de recherche est également détaillée et visible dans le Tableau 7.

Dans la partie suivante, la méthode adoptée est expliquée et argumentée et le classement initial des entreprises est défini et permet de proposer l'échantillon d'entreprises à enquêter. Les orientations pour la suite de la recherche sont également posées et notamment par les différents tris faits sur l'échantillon de base (179 entreprises) et resserré (33 entreprises).

L'étude de cas a été privilégiée parce qu'elle consiste à étudier « une personne, une communauté, une organisation ou une société individuelle » (Roy 2003), et concerne des phénomènes dont les contours n'ont pas encore été bien définis (Miles and Huberman 2013). Yin, quant à lui (Yin 2014), considère l'étude de cas en tant qu'enquête empirique à mener afin de cerner un phénomène contemporain dans son contexte réel et tout particulièrement quand les frontières entre le phénomène et le contexte ne sont pas clairement définies.

En résumé, l'étude de cas permet de porter une attention particulière à une problématique encore peu explorée.

1.2. Méthode de recherche

1.2.1. L'étude de cas

La méthode d'étude de cas est donc tout indiquée pour étudier l'organisation qui a atteint une maturité mécatronique importante et qui n'a pas encore été identifiée en tant que mécatronique. Elle peut se limiter à un seul cas ou s'appliquer à des cas multiples. Dans cette étude, le nombre de cas étudiés (5 entreprises) a été limité mais les cas retenus ont été choisis en fonction de leur hétérogénéité concernant la taille de l'entreprise, l'âge et les domaines de métier.

Il est également intéressant de mentionner la dimension interprétative de (Merriam 1998) parce qu'elle permet de définir l'objet de l'étude par sa nature particulariste, descriptive, heuristique et aussi bien inductive qu'abductive. Selon cette auteure, l'étude de cas est particulariste parce qu'elle s'intéresse à une situation, un événement, un programme ou un phénomène spécifique. Elle est descriptive par son produit final qui constitue une riche description du phénomène étudié. Par sa dimension heuristique, l'étude de cas peut conduire à une compréhension nouvelle d'un phénomène ou confirmer ce qui est déjà connu. Finalement, elle est inductive et également abductive parce qu'elle vise l'exploration d'un phénomène tout en revenant vers les concepts et hypothèses préétablies afin d'en vérifier la pertinence, pour les enrichir ou encore formuler une théorie.

Le Tableau 4 met en exergue les liens entre les caractéristiques attribuées à l'étude de cas par Merriam (Merriam 1998) et celles de cette recherche.

Caractéristiques de l'étude de cas selon (Merriam 1998)	La recherche sur un référentiel mécatronique
Particulariste	L'étude de la mécatronique constitue un objet de recherche encore peu étudié.
Descriptive	Les résultats proposent une description riche et détaillée de différents contextes d'utilisation des outils d'évaluation de la mécatronique et à plusieurs niveaux : organisation, produit et processus.

Caractéristiques de l'étude de cas selon (Merriam 1998)	La recherche sur un référentiel mécatronique
Heuristique	L'exploration, le questionnement ainsi que les échanges avec les spécialistes, les acteurs du réseau mécatronique et les entreprises mènent à une connaissance plus approfondie du phénomène de la mécatronique.
Inductive et abductive	L'analyse est faite sur 179 cas génériques, les 33 cas représentatifs de la mécatronique et les 5 entreprises championnes de la mécatronique individuellement à partir des concepts exposés dans le cadre conceptuel du méta-modèle de Mintzberg. Des liens de ressemblances et de différences ont été dégagés, ce qui favorise la généralisation, aux seuls cas étudiés, de certains aspects plutôt que la vérification d'hypothèses préétablies seules.

Tableau 4 : Liens entre les caractéristiques d'étude de cas et cette étude

Si l'étude de cas est particulièrement indiquée pour la recherche qualitative (Stake 2000), sa validité interne n'en est que plus exhaustive quand elle est combinée à de la recherche quantitative (Yin 2014) ce qui en assure également la validité externe ou la généralisation. Afin de dépasser une posture interprétative et pouvoir étendre ces résultats à un ensemble plus vaste, la génération de métriques a été adoptée. Des données quantitatives permettent de dégager des tendances pouvant servir de label qui, tel que suggéré par (Stake 2005) peuvent appuyer le regard interprétatif posé sur les cas étudiés. Le nombre restreint de cas favorise une étude approfondie par le recours possible à de multiples outils (Roy 2003), (Yin 2014) tels que des entretiens semi-directifs, des supports de présentation, des échanges avec les spécialistes et les entreprises, des analyses de contenu interprétés par plusieurs chercheurs, des écrits pris de sources variées comme les documents internes des entreprises, la consultation des sites d'entreprises, la participation aux colloques etc.

Tout ceci contribue à la validité et à la fiabilité des résultats. Il s'agit de caractéristiques qui sont essentielles à la rigueur de l'étude de cas (Gagnon 2005). Enfin, l'étude des cas retenus permet de considérer la particularité des contextes de chacun, tout en favorisant la mise en lumière de ressemblances et de différences par une analyse comparative qui mène aux conclusions plus générales. A savoir, les 5 entreprises choisies sont d'âge et de taille différents et même si elles font toutes de la mécatronique, elles se spécialisent respectivement dans la (1) fabrication de lignes de production, les (2) technologies de préhension - pneumatique, les (3) pompes mécatroniques hydrauliques, les (4) actionneurs électromagnétiques et les (5) roulements instrumentés.

1.2.2. Design ou architecture de recherche

Le design ou architecture de recherche⁶ est la représentation de la façon dont la recherche d'étude de cas a été menée. Il est constitué de toutes les phases de recherche et rend compte du type de données recueillies, de leur traitement qualitatif et/ou quantitatif, des supports créés, des validations intermédiaires, des applications éventuelles, des résultats et des livrables dus. Bref, c'est une synthèse de la façon dont la recherche a été structurée et menée.

Lorsque l'étude de cas a été retenue comme méthode de recherche, le design de recherche enchâssé apporte une précision supplémentaire au travail de recherche. Il se caractérise par plusieurs cas emboîtés dans un seul cas. Plusieurs unités qui se trouvent au sein du cas d'ensemble aident le chercheur à focaliser la recherche (Yin 2014). Relativement à l'étude de cas enchâssé proposée par Yin, Dumez (Dumez 2013) considère que toute étude de cas est de fait enchâssée ou emboîtée puisque

⁶ « La terminologie « plan de recherche » est classiquement employée dans les recherches de type hypothético-déductives et quantitatives. (La terminologie « canevas » (Miles & Huberman, 1994/2003) est davantage utilisée par les chercheurs qui optent pour des recherches dans lesquelles il y a beaucoup d'itérations avant de stabiliser la problématique. Le terme « design », plus générique, équivaut aussi à « architecture », termes plus neutres que les deux précédents. » (Giordano and Jolibert 2012)

l'essence de l'étude de cas est comparative et que l'on doit tout comprendre à partir d'un cas.

Il s'agit de prendre en compte de nouvelles visions émergeant de l'analyse de l'une des unités qui ne remettent pas en cause le design initial, mais permettent d'approfondir des analyses réalisées dans les autres unités. L'étude de plusieurs unités permet en effet de multiplier les angles d'approche du phénomène étudié, de faire émerger de nouvelles compréhensions, de les confronter aux explications rivales et d'en tester la pertinence auprès d'autres unités au cours même de l'étude ; ce qui correspond à ce que David appelle des boucles d'abduction (David, Hatchuel, and Laufer 2012). L'originalité d'une étude de cas réside aussi dans le fait que l'on est capable de redéfinir le cas après une première collecte et observation du terrain (Yin 2014). De plus, tout ceci renforce sa validité interne ainsi que la validité du construit (Yin 2014) comme montré dans le Tableau 5.

Construit ou variable	<i>« La représentation d'une problématique ou d'une catégorie de concepts par un ensemble de catégories pour établir des schémas de ces catégories ».</i>
Catégorie	<i>« Une catégorie est ainsi une classe « d'objets » supposées disposer d'attributs similaires ».</i>

Tableau 5 : Définitions : construit, variable, catégorie dans (Thiétart and Coll. 2007)

Dans cette étude, le cas est représenté par le syndicat de la mécatronique Artema à l'intérieur duquel s'emboîtent 5 entreprises retenues comme championnes (cas enchâssés). On pourrait également dire qu'il s'agit d'un multi-cas dans un cas comme montré dans le Tableau 6.

	Cas unique	Cas multiples
Holistique (une seule unité d'analyse)	Type 1	Type 3
Enchâssé (unités d'analyse multiples)	Type 2	Type 4

Tableau 6 : Typologie d'études de cas, adapté de Yin (2003)

Ces 5 cas ont été choisis selon le principe de réplique littérale et théorique (Royer and Zarlowski 2007), (Yin 2014). A savoir, ils sont suffisamment parents pour permettre une comparaison pertinente (réplique théorique) : ils font tous des produits mécatroniques et produisent donc des résultats similaires aux niveaux organisationnel, produit et processus. Ils sont suffisamment contrastés pour permettre une généralisation des résultats : ils sont de différentes tailles, issus de différents secteurs métiers et produisent donc des résultats différents pour des raisons prévisibles (réplique littérale). Les 5 entreprises ont été étudiées de près sous différents angles de vue et un échange régulier a été entretenu avec le comité mécatronique qui a assuré le suivi. Il a d'ailleurs été créé au sein même du syndicat à cet effet.

Les trois grandes phases dans le design de recherche sont synthétisées et schématisées dans le Tableau 7.

1.2.3. La phase du prétest

La phase du prétest dans le design ou l'architecture de recherche équivaut au point de stabilisation de la problématique, au stade où les orientations pour la suite de la recherche peuvent être posées. On peut dessiner ou décider d'un modèle de recherche précis. Dans cette thèse, ce dernier doit être construit de façon à répondre essentiellement à la question : par quels moyens objectifs et reproductibles les petites et moyennes entreprises traditionnelles du secteur de décolletage mécaniques peuvent-elles être aidées lorsqu'elles choisissent de s'engager dans la conception et la production de produits mécatroniques ?

DESIGN DE RECHERCHE POUR REFERENTIEL MECATRONIQUE																
GRANDES ETAPES	PHASE DANS LE DESIGN DE RECHERCHE	UNITE D'ANALYSE	TYPE DE DONNEES UTILISEES				SUPPORTS CREEES			VALIDATIONS INTERMEDIAIRES			APPLICATIOMS	LIVRABLES	DESCRIPTIOIN DE	
			200	Cf. Dicm	50	10	20	1	1	1	2	1				6
2013 / 2014	PRETEST	ORGANISATION	SITES ENTREPRESES	BIBLIOGRAPHIE	RAPPORTS ARTICLES DE PRESSE	CONFERENCES SEMINAIRES	AVIS EXPERTS	BASE DE DONNEES	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	MECANISME DE MENTORING	COMITE MECATRONIQUE	COMITE MECATRONIQUE	EXPERTS	MEASURE DE DISTANCE ENTRE MODELES THEORIQUES ET ENTREPRISES	META-MODELE INSTRUMENTE	LE DEGRE DE MECATRONIQUE SE RAPPROCHE LE PLUS D'ORGANISATION MODERNE ET
			200	BIBLIOGRAPHIE	RAPPORTS ARTICLES DE PRESSE	CONFERENCES SEMINAIRES	AVIS EXPERTS	BASE DE DONNEES	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	MECANISME DE MENTORING	COMITE MECATRONIQUE	COMITE MECATRONIQUE	EXPERTS	MEASURE DE DISTANCE ENTRE MODELES THEORIQUES ET ENTREPRISES	META-MODELE INSTRUMENTE	LE DEGRE DE MECATRONIQUE SE RAPPROCHE LE PLUS D'ORGANISATION MODERNE ET
2015 / 2016	PHASE DANS LE DESIGN DE RECHERCHE	UNITE D'ANALYSE	TYPE DE DONNEES UTILISEES				SUPPORTS CREEES			VALIDATIONS INTERMEDIAIRES			APPLICATIOMS	LIVRABLES	DESCRIPTIOIN DE	
			6	5	5	3	3	1	3	3	2	1				6
2015 / 2016	REPOSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE	PRODUIT	CATALOGUES DE PRODUITS	NORMES	BIBLIOGRAPHIE	AVIS DES ENTREPRESES	DOCUMENTS INTERNES DES ENTREPRESES	PRESENTATIONS	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	METROUES	ENTREPRESES	COMITE MECATRONIQUE	CONFERENCE	TEST DE METRIQUE SUR LES PRODUITS	METHODOLOGIE POUR MESURER LA MECATRONICITE DU PRODUIT	LE DEGRE DE MECATRONICITE DU PRODUIT ET DE MESURER
			CATALOGUES DE PRODUITS	NORMES	BIBLIOGRAPHIE	AVIS DES ENTREPRESES	DOCUMENTS INTERNES DES ENTREPRESES	PRESENTATIONS	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	METROUES	ENTREPRESES	COMITE MECATRONIQUE	CONFERENCE	TEST DE METRIQUE SUR LES PRODUITS	METHODOLOGIE POUR MESURER LA MECATRONICITE DU PRODUIT	LE DEGRE DE MECATRONICITE DU PRODUIT ET DE MESURER
2016 / 2017	PHASE DANS LE DESIGN DE RECHERCHE	UNITE D'ANALYSE	TYPE DE DONNEES UTILISEES				SUPPORTS CREEES			VALIDATIONS INTERMEDIAIRES			APPLICATIOMS	LIVRABLES	DESCRIPTIOIN DE	
			2	6	3	5	1	5	3	2	2	0				1
2016 / 2017	RECHERCHE DE LIENS ENTRE PRODUIT ET PROCESSUS	PROCESSUS	NORMES	BIBLIOGRAPHIE	AVIS ENTREPRESES	DOCUMENTS INTERNES DES ENTREPRESES	PRESENTATIONS	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	ENTREPRESES	COMITE MECATRONIQUE	CONFERENCE	EN PERSPECTIVE	MODELE DE MATURITE MECATRONIQUE	LE DEGRE DE MECATRONICITE DU PRODUIT IMPACTE ET ORIENTE LE MODELE D'AFFAIRES		
			NORMES	BIBLIOGRAPHIE	AVIS ENTREPRESES	DOCUMENTS INTERNES DES ENTREPRESES	PRESENTATIONS	QUESTIONNAIRES ENLIGNES	ENTREPRESES	COMITE MECATRONIQUE	CONFERENCE	EN PERSPECTIVE	MODELE DE MATURITE MECATRONIQUE	LE DEGRE DE MECATRONICITE DU PRODUIT IMPACTE ET ORIENTE LE MODELE D'AFFAIRES		

Tableau 7 : Design de recherche Référentiel mécatronique schématisé

1.2.4. Recensement des entreprises mécatroniques

A ce stade, il convient d'introduire trois concepts que sont la population, l'échantillon et l'univers général dans la méthode de recherche qualitative. Beaud (Beaud, 1984 : 178) a illustré une population et respectivement un échantillon en se servant de la différence qu'il y a entre la préparation d'un plat et le fait de goûter ce plat. En paraphrasant cet auteur, on recueille de l'information sur une fraction de l'ensemble en goûtant une cuillerée (prélever un échantillon) d'un plat aux cœurs de palmiers (connaissance générale de ce que c'est) qui est dans une casserole (population) que nous voulons étudier (Pirès 1997).

	Niveau	Beaud (1984)	Pires (1997)	Référentiel mécatronique
Population	Empirique	<i>L'ensemble étudié (casserole)</i>	<i>Univers variable (savoir ce qu'est un potage aux cœurs de palmiers)</i>	Industrie, activités spéciales scientifiques et technologiques et commerce
Echantillon	Empirique	<i>Une fraction de l'ensemble étudié (une cuillerée)</i>	<i>Variables de connaissance (voir si c'est assez salé)</i>	Entreprises de l'écosystème de la mécatronique
Univers général de cette étude	Théorique	<i>Une connaissance générale</i>	<i>Connaissance générale de ce qu'est un potage aux cœurs de palmiers</i>	Entreprise à important degré de maturité mécatronique

Tableau 8 : Définition des concepts « population, échantillon, univers général » projetés à notre cas ; adapté de (Pires 1997)

Comme montré dans le Tableau 8, les concepts d'échantillon et de population se modifient en fonction de connaissances recherchées. Cette connaissance change ainsi de niveau en passant du niveau empirique « consistant à savoir si notre **potage X** dans la **casserole Y** à tel jour est bien salé », au niveau théorique **Z** ayant pour but de savoir ce que c'est « un potage aux cœurs de palmiers ». Ramené à l'étude de référentiel mécatronique, on étudie les entreprises industrielles dans un écosystème composé d'acteurs qui font de la mécatronique pour mieux comprendre ce qu'est l'entreprise mécatronique.

1.2.5. Population cible

Les bases de données consultées pour dégager une population cible sont celles de l'INSEE et de l'EUROSTAT⁷. Parmi des études publiées, celles relatives à la structure du tissu productif (INSEE, Bonnet, and Lavergne 2013), à la spécificité des régions comme Rhône-Alpes (INSEE et al. 2013) ont été plus particulièrement prises en considération et les données recueillies entre 2011 et 2013 tout en sachant que ces études s'appuient sur les données pouvant remonter jusqu'en 2007. Une étude régionale parue récemment et dédiée aux solutions pour l'industrie du futur a également été consultée (CCI Auvergne-Rhône-Alpes 2016).

Le décret de décembre (INSEE 2008) définit une entreprise comme la plus petite combinaison **d'unités légales** qui constitue « une unité organisationnelle de production de biens et services jouissant d'une certaine autonomie de décision, notamment pour l'affectation de ses ressources courantes ». Depuis lors, l'entreprise se définit à partir de critères non seulement légaux mais aussi économiques selon 4 catégories : la microentreprise MIC, la petite et moyenne entreprise PME (qui peut être aussi la petite TPE sans avoir des exonérations de la microentreprise), l'entreprise de taille intermédiaire ETI et la grande entreprise GE : les caractéristiques de chacune sont indiquées dans le Tableau 9.

Sigle	Nomenclature	Critères d'appartenance
MIC	Microentreprise	<i>< 10 salariés et CA annuel < 2 millions d'euros</i>
PME	Petite et Moyenne Entreprise	<i>< 250 salariés et CA < 50 millions d'euros</i>
PMI	Petite et Moyenne entreprise Industrielle	

⁷ INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques. EUROSTAT est chargé de la conduite de la politique communautaire dans le domaine statistique à laquelle l'INSEE contribue activement, soit en y participant directement, soit en coordonnant les positions des différents services statistiques ministériels.

ETI	Entreprise de Taille Intermédiaire	< 5000 salariés et CA < 1 500 millions d'euros
GE	Grande Entreprise ou Groupe	Ensemble de sociétés liées entre elles par des participations au capital et parmi lesquelles l'une exerce sur les autres un pouvoir de décision

Tableau 9 : Catégories d'entreprise selon (INSEE 2008)

En 2013, il y a en France 3,75 millions d'entreprises dans le secteur marchand non agricole. La présente étude prend en compte les entreprises PME ou PMI, quelques ETI et GE.

La distribution des emplois relativement à ces catégories d'entreprise est présentée Figure 2 .

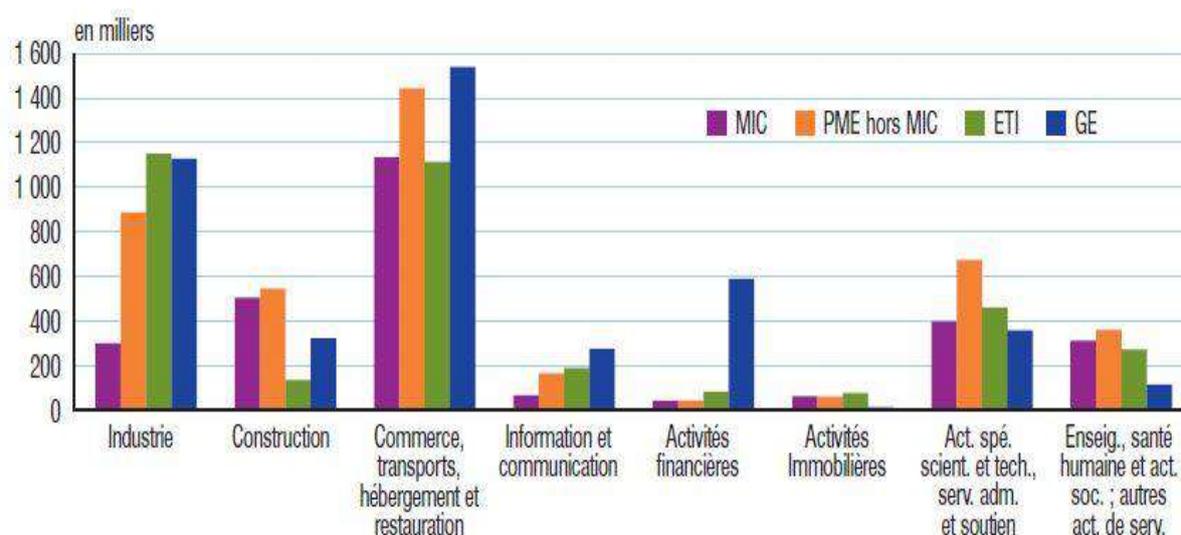


Figure 2 : Effectifs selon secteur d'activité et catégorie d'entreprise 2013, source : INSEE

La population qui relève de cette étude se situe dans les secteurs marchands non agricoles et non financiers : industrie, activités spéciales scientifiques et technologiques et commerce comme montré sur la Figure 2 et synthétisé auparavant dans la première ligne de la dernière colonne du Tableau 8.

En 2014, les secteurs retenus pour l'étude (marchands non agricoles et non financiers) réalisent une valeur ajoutée de 974 milliards d'euros soit 51% de l'ensemble de

l'économie française. Le chiffre d'affaires et la valeur ajoutée évoluent plus favorablement pour les PME, PMI, ETI et GE que pour les MIC. Les investissements s'élèvent à 2 milliards d'euros et sont réalisés par les entreprises à partir de la taille de Petites et Moyennes Entreprises. En revanche les exportations qui ont atteint 208 milliards d'euros sont réalisés à 80% par deux secteurs, l'industrie (341 milliards d'euros) et le commerce en général (145 milliards d'euros) mais sont attribuables à 76% du total des 208 milliards d'euros à 5000 entreprises (INSEE 2016).

La Figure 3 montre les courbes de l'évolution annuelle de la production de l'industrie manufacturière en France et dans l'Union Européenne (pourcentage par rapport à la production totale). On peut observer, que les deux courbes suivent une même tendance. Cette activité manufacturière en Europe est d'ailleurs concentrée dans les régions européennes comme celle de la région Flamande, de la Vénétie, du Piémont, de la Catalogne, du Land de Basse-Saxe, de Provence-Alpes-Côte d'Azur et de l'Auvergne-Rhône-Alpes. Dans toutes ces régions, le PIB par habitant se situe entre 101% et 118% de la moyenne européenne, Rhône-Alpes se situant à 108% (INSEE et al. 2013). C'est pourquoi il est judicieux de s'intéresser à l'étude d'une région représentative de l'industrie au niveau européen comme celle de l'Auvergne-Rhône-Alpes en France aujourd'hui.

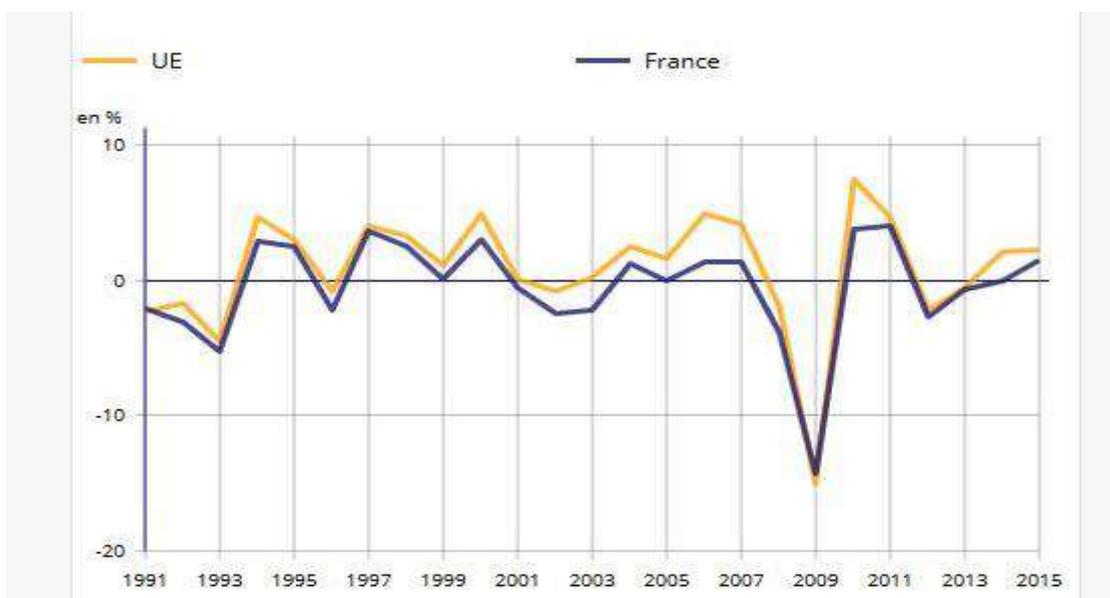


Figure 3 : Évolution annuelle de la production de l'industrie manufacturière en France et dans l'UE. Champ : industrie manufacturière y compris industrie agroalimentaire, source Eurostat

En effet, avec 7,8 millions d'habitants, Auvergne-Rhône-Alpes concentre 12 % de la population française sur 13 % de sa superficie. En 2015, le produit intérieur brut (PIB) d'Auvergne-Rhône-Alpes s'élève à 242 milliards d'euros. La région occupe le deuxième rang national derrière l'Île-de-France, et produit 11,6 % de la richesse en France métropolitaine. Elle se place à la sixième place des régions européennes relativement au PIB. Depuis 25 ans, une croissance significative dans les secteurs de l'électronique et de l'informatique (405 immatriculations, 23 800 employés, 18% de la masse salariale française en 2015) est observée. La région est aussi en tête au niveau national quant aux pôles de compétitivité : en 2013 elle en compte déjà 15 parmi les 71 projets labellisés en France depuis 2007 dont le pôle Mont Blanc Industries et Thésame en tant que partie prenante du pôle Mont Blanc Industries pour la mécanique. La région se distingue à la fois par l'équipement industriel dont la fabrication de machines et autres équipements et assure 20 % de la richesse créée en France par la fabrication de machines/équipements industriels. Cette industrie régionale est par ailleurs bien présente à l'international. Les exportations de machines ont représenté une valeur de 7,4 milliards d'euros en 2015 (20 % du total national). Pour les seules machines spéciales, Auvergne-Rhône-Alpes est à l'origine de 36 % des exportations françaises (CCI Auvergne-Rhône-Alpes 2016). L'Auvergne-Rhône-Alpes est aussi la 2^{ème} région numérique de France, après l'Île-de-France. Les activités productrices de technologies de l'information et de la communication comptaient 5 200 établissements et 90 000 emplois salariés en 2014 (CCI Auvergne-Rhône-Alpes 2016). La valeur ajoutée conjointe de ces activités est estimée à 4,5 milliards d'euros. La région représente une part particulièrement forte de l'industrie nationale pour la fabrication de technologies de l'information et de communication (TIC) (20 % des effectifs salariés). Elle représente notamment 80 % de l'offre nationale dans le logiciel industriel.

De plus, une enquête réalisée en début 2016 par la CCI Auvergne-Rhône-Alpes a identifié une population de 550 entreprises désignées de « Offreurs de solutions pour l'industrie du futur » dans la région Auvergne-Rhône-Alpes seule. En s'appuyant sur ces données, on en conclut que la France et en particulier la région Auvergne-Rhône-Alpes constituent un terrain suffisamment riche pour mener une première étude sur la qualification de l'entreprise mécanique.

1.2.6. Echantillonnage

Pour constituer l'échantillon à étudier, une base de données propre à l'étude de la mécatronique a été constituée et pour cause : il n'a pas été possible de l'extraire à partir des bases de données existantes à partir de codes NAF⁸, par exemple, parce que l'activité mécatronique en tant que telle n'as pas encore été identifiée auprès des organismes comme l'INSEE ou les Chambres de commerce. De ce fait, il a fallu trouver des critères discriminants et représentatifs de cette activité mécatronique. C'est pour cette raison, que l'échantillon n'a pas été fixe dès le départ mais a évolué au gré de nouvelles connaissances cumulées pendant la phase de recherche exploratoire. Cette évolution de l'échantillon n'est pas vraiment problématique puisque les échantillons en analyse qualitative ne sont pas entièrement pré-spécifiés et peuvent évoluer au fil de la recherche (Thiétart and Coll. 2007). Cependant, afin de rendre la recherche généralisable, plusieurs techniques de collecte, de réduction et d'analyse de données doivent être utilisées (Altheide 1994) (Miles and Huberman 2013) (Silverman 2001). Ce travail a tenu compte de ces préconisations d'ordre méthodologique comme cela est synthétisé dans le Tableau 7 qui présente le design de recherche, défini précédemment.

La partie suivante rend compte de la sélection initiale et de l'évolution de l'échantillon en cours de l'étude exploratoire qui se termine par un prétest qui a permis de mesurer l'impact de cette dernière. Rappelons que la phase du prétest dans le design ou l'architecture de recherche équivaut au point de stabilisation de la problématique et permet de dessiner un modèle de recherche. Donc, avant de pouvoir répondre à la question de recherche générale, pour rappel : « Par quels moyens objectifs et reproductibles les petites et moyennes entreprises traditionnelles du secteur de décolletage mécaniques peuvent-elles être aidées lorsqu'elles choisissent de s'engager dans la conception et production de produits mécatroniques ? », il a été impératif de constituer un échantillon représentatif de la mécatronique. Ainsi, deux

⁸ Le code NAF (pour Nomenclature d'activités française) est un code attribué par l'INSEE à chacun des secteurs d'activités économiques.

affinages (Thiéart and Coll. 2007) du premier échantillon de 179 entreprises ont été faits à l'aide de critères de sélection que nous avons élaborés (ils sont présentés ci-après). Cet affinage a conduit à une première réduction de l'échantillon de 179 entreprises observées à 33 entreprises.

En synthèse, 179 entreprises ont été finalement traitées, 20 spécialistes⁹ consultés, 33 entreprises ont été sélectionnées pour constituer un panel resserré qui est traité de plus près dans le Chapitre 2 et 5 entreprises volontaires nous ont accueilli pour des séances de travail et d'échange. Trois d'entre elles nous ont permis d'étudier leurs produits pour en déterminer le degré de mécatronicité par le biais des métriques proposées dans le Chapitre 3. Enfin, le Chapitre 4 restitue l'étude de processus nécessaires pour faire de la mécatronique et propose un modèle de maturité mécatronique.

1.3. L'étude exploratoire : l'identification des champions mécatroniques par la mise en évidence des paramètres visibles et distinctifs de la mécatronique

Pour obtenir une taille minimale d'échantillon de trente unités observées, comme cela est préconisé pour une recherche qualitative, afin qu'elle soit suffisamment exhaustive (Thiéart and Coll. 2007), il a fallu déterminer une population suffisamment spécifique qui permette ce choix. Le réseau national mécatronique et régional est suffisamment

⁹ Discussions avec des spécialistes : Laurence Chérillat (Artema), Olivier de Gabrielli (Thésame), Olivier Duverger (Cetim), Valérie Jobin (pôle Mont Blanc Industries), Eric Valentini (Observatoire de la sous-traitance OSST) ; Les entreprises : Benoit Jusselin (Schneider Electric), Yannick Edel (Edel Tamp), Anthony Bénéteau (Bosch Rexroth), Pierre Milhau (Coval), Olivier Tourneur (Pack'Aéro), Stéphane Chaperôt (Poclain Hydraulics), Hervé Lénon (NTN-SNR) ; universitaires de l'Université Mont Blanc : Rachel Bocquet et Sandra Dubouloz (IREGE), Lamia Berrah (LISTIC), Christine Barthod et Georges Habchi (SYMME) ; universitaires de l'Université de Grenoble Alpes : Lilia Gzara (G-SCOP) et enfin Olivia Penas et Aude Warniez de SUPMECA de Paris (LISSMA).

spécifique pour la constitution d'une base de données et intègre des entreprises qui réalisent des CA qui dépassent 100 000 euros par personne, qui s'organisent en réseaux mécatroniques, les entreprises qui sont issues essentiellement des régions représentatives de l'activité industrielle comme l'Auvergne-Rhône-Alpes et Ile-de-France ou encore Provence-Alpes-Côte d'Azur. Quatre listes de réseaux de l'écosystème mécatronique répondent aux critères spécifiés plus haut. Ainsi, ont été prises en compte les entreprises qui sont adhérentes au syndicat de la mécatronique Artema, qui sont répertoriées comme mécatroniques à Thésame et/ou au pôle Mont Blanc Industries et/ou font partie des Lauréats du Label d'excellence Mont Blanc Industries et/ou sont parmi les Leaders de l'Industrie de Haute-Savoie. Quelques autres entreprises en dehors de ces listes ont été également incluses dans le panel pour tenir compte des préconisations des spécialistes⁹. Le panel de départ était ainsi constitué de 179 entreprises dont 55 PME/PMI et une visualisation de la localisation de ces 179 entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique est disponible sur la Figure 4.

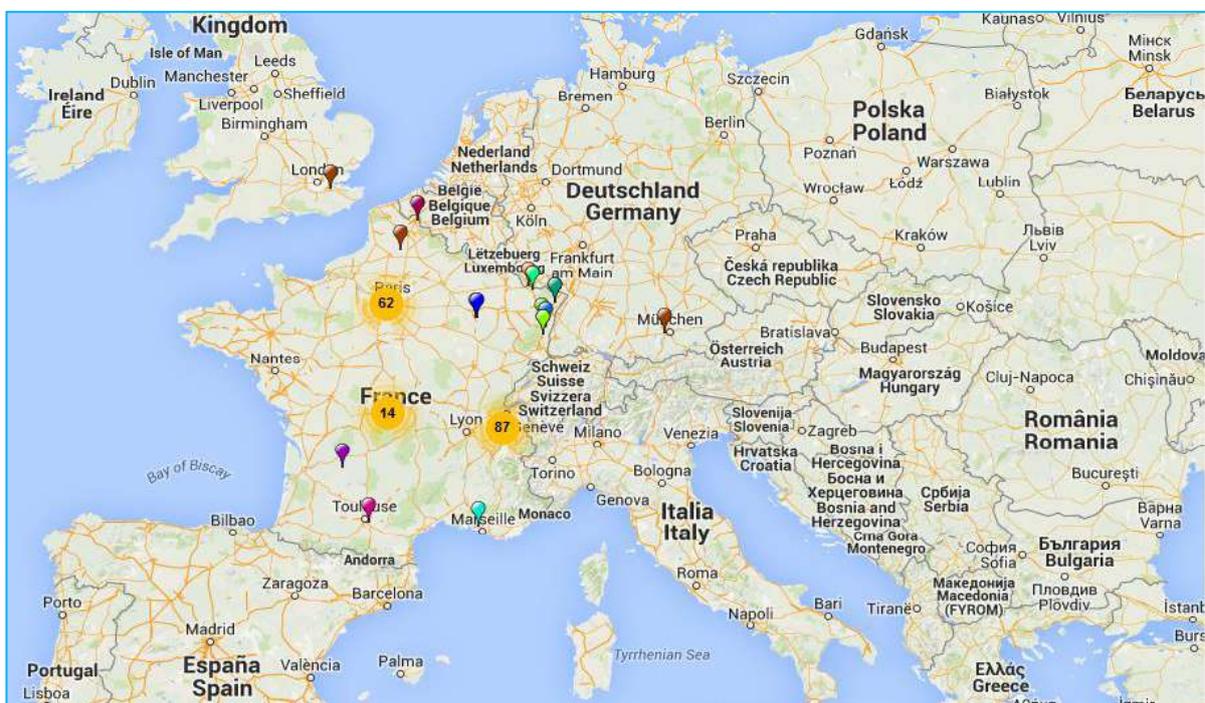


Figure 4 : Localisation des 179 entreprises relevant a priori de la mécatronique

Pour répondre à la question : « Qu'est-ce faire de la mécatronique ? », on a procédé par plusieurs étapes.

A ce stade de la restitution, il convient d'introduire quelques principes et concepts méthodologiques supplémentaires dont la diversification et la saturation. Selon ces principes, on doit rechercher des réponses à partir des sources de données différentes et jusqu'à ce que l'on commence à obtenir des réponses similaires ou identiques.

A savoir, pour Glaser et Strauss (1967) et Michelat (1975), le principe de diversification (Tableau 10) doit donner un panorama le plus complet possible des problèmes ou situations, une vision d'ensemble ou encore un portrait global d'une question de recherche dans (Pirès 1997). La constitution du panel initial et des échantillons par la suite répond à ce principe.

Type de Diversification	Externe (intergroupe)	Interne (intragroupe)
Méthode	<i>Choisir des individus les plus divers possibles.</i>	<i>Choisir des individus les plus homogènes possibles.</i>

Tableau 10 : Le principe de diversification

Quant au principe de saturation (Tableau 11), il est à la fois un concept et un critère d'évaluation méthodologique de constitution de l'échantillon. En tant que concept, il peut être théorique selon Glaser et Strauss (1967) ou empirique (Bertaux 1981) dans (Pirès 1997).

Principe de saturation	Saturation théorique	Saturation empirique ou de connaissance
Concept	<i>Lorsque le concept émerge des données et est confronté à différents contextes empiriques qui n'ajoutent aucune propriété nouvelle au concept créé, ce dernier est saturé.</i>	<i>Le phénomène par lequel le chercheur juge que les entretiens, documents, observations ou entrevues n'apportent plus d'informations nouvelles ou différentes pour continuer avec le recueil du matériel empirique.</i>

Tableau 11 : Le concept de saturation

Afin de répondre à la question « Qu'est-ce faire de la mécatronique ? », plusieurs sources ont été utilisées comme montré dans le design de recherche visible dans le Tableau 7 sous la rubrique type de données et supports créés. Un panorama le plus

complet de la mécatronique a été recherché, ce qui correspond au type de diversification externe.

Lors d'une première étape, et en accord avec ces principes méthodologiques, il a été demandé à une vingtaine de spécialistes⁹ comment ils définiraient un champion mécatronique. Selon eux, un champion mécatronique sait concevoir, produire et bien vendre les produits mécatroniques. Il sait également s'adapter aux marchés, innove constamment en matière de produits et services et intègre des processus de support innovants. Cette définition généraliste par les spécialistes est visible dans le Tableau 12.

Un champion mécatronique sait concevoir, produire et bien vendre les produits mécatroniques. Il sait également s'adapter aux marchés, innove constamment en matière de produits et services et intègre des processus de support innovants.

Tableau 12 : La définition synthétique d'un champion mécatronique par les spécialistes

On leur a demandé ensuite par quels moyens, selon eux, ces champions ont-ils réussi à développer des compétences aussi complexes ?

Leurs réponses sont synthétisées dans le paragraphe suivant.

A un stade de leur évolution, ils ont introduit des compétences de R&D en commençant par un bureau d'études, des métiers en ingénierie différents de leurs métiers de base (des électroniciens pour les mécaniciens, les informaticiens pour les électroniciens ou en faisant le cumul de ces métiers). Parallèlement aux compétences métiers, ils ont intégré des compétences en technologies de l'information, surtout en conception assistée par l'ordinateur (CAO) et différentes activités de support à la vente comme le marketing, ces derniers aussi supportés par les technologies d'Information pour gérer d'une part les données de conception et d'autre part les études de marchés afin d'intégrer de plus en plus leurs clients et sous-traitants dans la définition des solutions. Les entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique selon eux intègrent 4 domaines (mécanique, électronique, informatique, automatismes), travaillent en réseau et innove en produits et en services et ceci d'une manière collaborative selon les définitions reportées dans les deux normes sur la mécatronique.

Les exemples cités pour les entreprises mécatroniques évoluées ou désignés de champions mécatroniques par les spécialistes⁹ sont visibles dans le Tableau 13.

CHAMPIONS MECATRONIQUES	POUR :
SCHNEIDER ELECTRIC	le développement des disjoncteurs.
DASSAULT en collaboration avec SKF	les commandes de vol.
JOHN DEER, MATROT et CNH	les systèmes ESP (Electronic Stability Program) qui contrôlent la stabilité du véhicule dans toutes les phases de roulage.
NTN-SNR	le roulement instrumenté à piste magnétique.
CARMAT	le développement du cœur artificiel.
KUKA	la robotique dans le secteur de machines de fabrication.
PACK'AERO en tant que fournisseur d'AIRBUS	le passage de commandes manuelles aux commandes numériques.
VALEO en tant qu'équipementier automobile	avoir su s'imposer comme un acteur incontournable proposant des solutions systèmes.
BOSCH	l'injection directe, les calculateurs de bord, la stabilisateurs de trajectoire.
DASSAULT AVIATION	pour les servocommandes hydrauliques introduites en 1970 pour leur Falcon 3 et le développement d'outils de conception CATIA (d'abord en interne ensuite proposé à la vente comme logiciel et accompagné de service de consultance).

Tableau 13 : Tableau récapitulatif des champions mécatroniques ainsi désignés par les spécialistes

A partir de ces avis, on a procédé à une observation directe et systématique des sites des 20 premières entreprises du panel, avec le relevé des pratiques qu'elles affichaient. La méthode de transcription utilisée était manuelle et le codage initial était

ouvert suivi par un codage sélectif (Thiétart and Coll. 2007). A partir de 127 pratiques, une récurrence a été observée. Une restitution synthétique de l'action descriptive a ensuite été donnée dans un tableau récapitulatif à l'aide d'un fichier Excel. Cette liste a ensuite été vérifiée sur 10 sites supplémentaires afin d'en tester l'exhaustivité. Parallèlement à ce travail, ces activités ont été reliées à une quarantaine de thèmes traités en théorie des organisations par le principe de regroupement et de classification de données appelé abstraction (Thiétart and Coll. 2007). Ce premier travail est visible dans [l'Annexe 1](#).

L'étape suivante a consisté à formuler des critères macroscopiques afin de distinguer les entreprises mécatroniques des autres entreprises d'une façon claire. L'application méthodique de 5 critères macroscopiques a été proposée et validée par les experts en mécatronique.

Ces cinq critères macroscopiques de sélection pour les entreprises mécatroniques sont répertoriés dans le Tableau 14.

CRITERES RETENUS	Critère n°1	Critère n°2	Critère n°3	Critère n°4	Critère n°5
	Fait partie des clusters de la mécatronique et affiche le terme mécatroniques sur le site internet	Incorpore des métiers mécatroniques	Fait effectivement des produits mécatroniques	Propose des produits hautement intégrés assortis de services	Excelle en matière d'intégration, d'innovation et d'organisation
NOTATION	0 à 8	0 à 4	0 à 1	0 à 3	0 à 3
Note globale = somme des notes de chaque critère (note maximale = 19)					

Tableau 14 : Critères macroscopiques pour définir une entreprise mécatronique

1.3.1. Détail des critères macroscopiques utilisés

Afin de pouvoir caractériser les entreprises étudiées, des critères de sélection devaient être élaborés. Ils sont visibles dans les tableaux ci-après.

Le Tableau 15 détaille la cotation du critère n°1 : L'entreprise fait partie des clusters de la mécatronique et/ou affiche le terme mécatronique sur le site internet et /ou est identifiée comme champion en mécatronique par les spécialistes consultés. Il est noté sur 8 points.

	1 point	1 point	1 point	1 point	1 point
FAIT PARTIE DES CLUSTERS DE LA MÉCATRONIQUE	Adhérente d'ARTEMA (Syndicat de la mécatronique)	Figure dans la rubrique Mécatronique de THESAME	Adhérente Mécatronique Pôle Mont Blanc Industries	Figure parmi les leaders de l'industrie de Haute-Savoie	A reçu le Label d'excellence Mont Blanc

	1 point		1 ou 2 points
AFFICHE LE TERME « MÉCATRONIQUE »	Utilise le terme mécatronique sur son site internet	IDENTIFIÉE COMME CHAMPION EN MÉCATRONIQUE	Fait partie des champions de la mécatronique d'après les experts concertés Cétim ou Thésame = 1 Cétim et Thésame = 2

Tableau 15 : Cotation du critère n°1

La définition de ces critères a permis différents tris. Lors de ces tris, il est apparu que peu d'entreprises affichent le terme mécatronique, en revanche celles qui le font le considèrent comme un avantage concurrentiel et vendeur, surtout les entreprises désignées comme champion par les experts.

Le détail du critère macroscopique n° 2 est visible dans le Tableau 16 : L'entreprise incorpore des métiers mécatroniques. Il est noté sur 4 points.

Il est considéré par les experts et la norme sur la mécatronique NF E 01-010 (AFNOR 2008) que les entreprises mécatroniques ont les quatre métiers mécatroniques : la mécanique, l'électronique, l'informatique et l'automatisme. Elles peuvent cependant les intégrer d'où le terme « a ces métiers ». On a supposé qu'elles peuvent également faire appel à ces métiers en externe, d'où le terme « connaît ces métiers ».

	1 point	1 point	1 point	1 point
A ou connaît les 4 métiers mécatroniques	Mécanique	Electronique	Informatique	Automatisme

Tableau 16 : Cotation du critère n°2

La cotation du critère macroscopique n° 3 est présenté dans le Tableau 17 : L'entreprise fait ou conçoit effectivement des produits mécatroniques. Il est noté sur 1 point.

A ce stade de l'étude, il n'a pas été possible d'évaluer à quel point un produit était mécatronique, d'où la notation binaire. A posteriori, ce critère est pourtant déterminant et il est à ce titre étudié de plus près dans le Chapitre 3 où une méthode pour évaluer un produit mécatronique est proposée. Ce critère a d'ailleurs été le point d'inflexion qui a repositionné la recherche sur le produit comme montré sur le design de recherche dans le Tableau 7.

1 point
Fait ou conçoit EFFECTIVEMENT des produits mécatroniques

Tableau 17 : Cotation du critère n°3

La cotation du critère macroscopique n° 4 est présentée dans le Tableau 18 : L'entreprise propose des produits hautement intégrés assortis de services. Il est noté sur 3 points.

	1 point	1 point	1 point
PRODUITS ET SERVICES A ou connaît des processus d'intégration fonctionnelle et/ou physique	L'intégration des produits est déductible à partir de l'observation de leur complexité. Mots clés : nombreuses applications, systèmes embaqués, automatismes, robotique, maintenance avancée.	Fait de la conception et de la production : depuis l'esquisse jusqu'aux produits finis et aux fonctionnalités diversifiées. Mots clés : Concepteur capable d'adapter les produits aux besoins client, systèmes de contrôle (à distance), consultance en ingénierie.	Processus de management de cycle de vie de produits ou PLM affichée. Mots clés : PLM, gestion de processus de conception et de fabrication, cycle de vie produit, processus de conception collaborative, offre de services et solutions.

Tableau 18 : Cotation du critère n°4

L'intégration fonctionnelle ou physique des produits peut être faite par l'entreprise ou sous-traitée, d'où le terme « a ou connaît des processus d'intégration fonctionnelle et/ou physique ».

Cette partie de l'étude a été faite avec le repérage de mots clés les plus souvent affichés sur les sites des entreprises étudiées et est synthétisée par « l'affichage de produits mécatroniques et services assortis ». Sous services assortis, on entend des services que ces nouveaux produits technologiques ou produits améliorés permettent de mettre en place. Par exemple, un produit mécanique auquel on aura ajouté de l'électronique et un logiciel de communication permettra la mise en place d'un service de maintenance à distance. Il permettra également à l'entreprise de revoir son modèle d'affaires et de remonter ainsi en gamme en proposant un service de maintenance prédictive.

Tout comme le critère n°3 « Fait effectivement des produits mécatroniques », le critère n°4 « Propose des produits hautement intégrés assortis de services » a été considéré comme important puisqu'il dépasse les limites du processus de conception en R&D classique et oriente l'étude vers les processus de conception collaborative. Cet aspect de la mécatronique sera donc traité plus en détail dans le Chapitre 4.

La cotation du critère macroscopique n° 5 est présentée dans le Tableau 19 : L'entreprise excelle en matière d'intégration, d'innovation et d'organisation. Il est noté sur 3 points.

	1 point	1 point	1 point
<p>PROCESSUS ORGANISATIONNELS Affiche des processus organisationnels complexes utiles à la mécatronique</p>	<p>Il n'y a pas d'affichage ou l'on peut supposer une complexité organisationnelle à partir de la complexité des produits affichés, ou encore à partir des procédés jugés complexes.</p> <p>Mots clés : Produits à forte intégration ou mécatroniques, contrôleurs, contrôle à distance, réseaux communicants.</p>	<p>L'entreprise parle ouvertement de l'approche qu'elle a de la complexité.</p> <p>Mots clés : Ingénierie des systèmes, « mécatronique », leader technique.</p>	<p>A une stratégie mécatronique déclarée: soit elle est nommée soit cela est évident depuis la complexité organisationnelle affichée comme par exemple la gestion des RH durable.</p> <p>Mots clés : Processus, stratégie (mécatronique), coopération, fournisseur à long terme, fournisseur intégré, contacts réguliers, proximité client, coopération et partenariat avec de grands groupes (signes d'Innovation Ouverte), formations sur le site du client, RSE, produit vert, technologie innovante, innovations, innovation organisationnelle.</p>

Tableau 19 : Cotation du critère n°5

Comme pour le critère précédent, cette partie de l'étude a été faite avec le repérage de mots clés les plus souvent affichés sur les sites des entreprises étudiées et peut être synthétisée comme l'affichage des processus organisationnels complexes utiles à la mécatronique.

1.3.2. Pondération des critères macroscopiques

Si au départ tous les critères ont été considérés comme équivalents en poids, il s'est avéré ultérieurement que certains critères étaient plus déterminants que d'autres. Le critère n°3 (Fait effectivement des produits mécatroniques) s'est ainsi avéré important au point qu'il a été mis au cœur de cette étude. En effet, l'hypothèse de travail dès lors a été que les activités et processus affichés sous les critères n°4 et n°5 n'étaient possibles que parce que l'entreprise concevait et développait ces produits qui ensuite permettent la mise en place de processus complexes. Ces derniers ont été observés au départ comme seulement utiles à la mécatronique. Dans les faits, le contraire doit être vrai : l'état de développement mécatronique du produit permet le changement de modèle d'affaires qui lui, nécessite la mise en place des processus qui en assurent la pérennité. En tout état de cause, un produit mécatronisé et multifonctionnel permet de proposer des services autres que ceux offerts par un produit mécanique monofonctionnel. Cet aspect est présenté d'une manière globale dans le Chapitre 2 et approfondi par les chapitres suivants.

Cette première classification permet également d'adopter le terme maturité qui est un nom féminin utilisé pour désigner l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement et un certain niveau de complexité. L'adjectif associé est mûr. D'après le dictionnaire Larousse, c'est aussi la caractéristique d'un écosystème ayant atteint un état d'équilibre avant de passer au stade suivant. Dans la littérature académique, il existe plusieurs définitions de maturité. Dans la mesure où la maturité d'une organisation se mesure de façon quantitative mais également qualitative (écoute du client, culture de l'organisation, travail en équipe, adaptation à l'environnement...) par rapport à la maturité de ces différents processus, l'élaboration du diagnostic se base normalement sur un état existant tel que, par exemple, les certifications déjà obtenues et s'appuie aussi sur une méthode d'évaluation. Deux dimensions sont donc prises en compte, le processus étudié et son degré de réalisation. Nous ne souhaitons pas faire une revue de littérature exhaustive, cependant, mentionnons ici deux modèles d'évaluation de maturité organisationnelle comme la méthode structurée autour de 22 domaines de processus appelée Capability Maturity Model Integration (CMMI 2010) ou encore Organizational Project Management Maturity Model (OPM3) proposée par le (Project Management Institute

1995) qui s'intéresse à mesurer le niveau de maturité d'une organisation dans sa pratique de gestion de projets. Le point commun entre les deux méthodes est qu'elles évaluent la maturité par différents domaines et différents degrés de réalisation (fonctionnement de base, défini, maîtrisé, optimisé, en amélioration permanente). En tout état de cause, ces mesures sont liées à des buts organisationnels posés au préalable et un état de lieux est fait au départ et les échelons de passage sont définis. Au fur et à mesure que l'organisation progresse vers le but établi, les processus se développent et l'organisation acquiert progressivement de la maturité dans les domaines dans lesquels elle voulait exceller.

Si l'on considère donc l'ambition de devenir mécatronique comme un projet, on peut faire appel aux références académiques relatives à la maturité de projet visibles dans le Tableau 20.

<i>Caractéristique d'un écosystème ayant atteint un état d'équilibre.</i>	Larousse www.larousse.fr
<i>La maturité est la « qualité ou l'état de devenir mûr ».</i>	(E.S. Andersen and Jessen 2003)
<i>La mesure de la maturité permet de « montrer l'état atteint par rapport à l'état dans lequel le projet devrait être » et ainsi de disposer des informations nécessaires pour faire évoluer/standardiser les processus.</i>	(Cooke-Davies and Arzymanow 2003)
<i>Un projet est dit mature si l'ensemble des processus qui le composent est maîtrisé et permet d'atteindre les objectifs fixés, cette maîtrise se contrôlant au fur et à mesure de l'avancement du projet.</i> <i>Le concept de maturité comprend : 1) la définition des critères de succès ; 2) la capacité à produire des succès répétitifs ; 3) la compréhension des causes de succès et des moyens de prévenir ou de corriger les problèmes courants.</i>	(Ramirez Gonzalez 2009)
<i>La maturité est « liée au développement des systèmes et des processus répétitifs qui représentent une haute probabilité de succès d'un projet ».</i>	(Kerzner 2004)

Tableau 20 : Définitions de la maturité

Dans le domaine du management de la qualité et de l'amélioration continue, on peut trouver des grilles génériques pour distinguer les différents échelons de maturité. La Norme Afnor FD X50-176 de 2005 relative au management de la qualité et au management des processus (Anon 2005) propose, par exemple, les grilles suivantes : Inexistant : 1 ; Fonctionnement de base : 2 ; Défini, planifié, suivi : 3 ; Maîtrisé, Optimisé : 4 ; Amélioration permanente : 5, que nous utilisons pour notre étude exploratoire.

Dès lors, il est possible d'utiliser ces grilles pour les critères macroscopiques et les échelonner en degrés de maturité mécatronique allant de Faible I à Très élevé V comme cela est présenté synthétiquement dans le Tableau 21. Les 5 critères macroscopiques détaillés plus haut sont rassemblés dans le Tableau 21 tout en prenant en compte les activités. Ils ont servi au tri qui a été effectué sur les 179 entreprises du panel initial. La somme des notes de chaque critère donne une note maximale à 19 points.

Note globale	0 à 3	4 à 7	8 à 11	12 à 16	17 et +
Détail du Critère global	Ont 1 et au plus 2 métiers mécatroniques mais ne font pas de produits mécatroniques et pas d'intégration	Ont jusqu'à 2 métiers mécatroniques, se lancent dans la conception et production mécatronique, commencent à avoir un interfaçage entre services ou activités	Ont entre 3 et exceptionnellement 4 métiers mécatroniques, font de la conception et production mécatronique, ont un interfaçage entre services et activités	Ont les 4 métiers mécatroniques, conception et production, intègrent les fournisseurs, commencent à proposer des produits et services, font de l'innovation Open	Ont les 4 métiers mécatroniques, conception et production, intègrent les fournisseurs sur une base de standards, proposent des produits et services, excellent en l'innovation Open
Maturité	I Faible	II Moyen	III Croissant	IV Élevé	V Très élevé

Tableau 21 : Définition du degré de maturité mécatronique

La maturité qualifiée de « Faible » (niveau I) correspond à un stade pour lequel les entreprises commencent à envisager la mécatronique en incorporant un métier

supplémentaire à la mécanique comme l'électronique, par exemple, mais ne font pas encore de conception proprement dite, ni d'intégration.

La maturité « Moyenne » (niveau II) est attribuée aux entreprises qui ne vont pas hésiter à incorporer au moins deux métiers mécatroniques, se lancer dans la conception et production mécatronique, ici la présence d'un bureau d'études mécatronique a été systématiquement recherchée pour plusieurs raisons : il devait témoigner de la transition qui consiste à passer d'une ingénierie traditionnelle composée de mécanique avec à un bureau d'études multidisciplinaire en intégrant donc des métiers différents. Nous pensons tout spécifiquement à l'informatique embarquée qui entraîne des transitions déterminantes. Enfin, parce que la présence d'un bureau d'études multidisciplinaire témoigne en faveur d'un interfaçage entre les services également.

Le troisième degré de maturité mécatronique (niveau III) est celui où l'on détecte une forte compétence en matière d'intégration de différents métiers. Les entreprises ayant cette maturité font effectivement de la conception et de la production de produits intégrés et savent passer d'un mode de fonctionnement en silo au mode transversal ou organique.

Le quatrième degré de maturité « Elevée » (niveau IV) est réservé aux entreprises qui ont en plus un savoir-faire en intégration des fournisseurs et une façon d'innover ouverte comme par exemple l'entreprise hors liste JEEDOM qui propose à n'importe quel acteur de contribuer aux développements de produits par le biais d'une plateforme informatique en ligne.

Le dernier degré de maturité proposé « Très élevée » (niveau V) est propre aux entreprises qui dépasseront les 4 degrés précédents par l'excellence et la servicisation et l'innovation ouverte.

Après avoir ainsi défini les différents niveaux de maturité, un tri a été effectué selon ces premiers critères de maturité sur l'ensemble du panel initial de 179 entreprises recensées. Le résultat de ce tri est visible dans le Tableau 22.

Degré de maturité des 179 entreprises recensés	I	II	III	IV	V
Panel de départ	13	32	47	83	4
Panel resserrée de 33 entreprises					
31 PMI	3	4	11	13	0
1 GE 1 ETI					2
Note globale	0 à 3	4 à 7	8 à 11	12 à 16	17 et +

Tableau 22 : Niveau de maturité pour les 179 entreprises et pour le panel resserré des 33 entreprises

Après ce tri global à l'aide des critères retenus, le panel de 33 entreprises a été extrait et analysé au regard de ces critères comme indiqué dans le design de recherche du Tableau 7. Ce panel resserré de 33 entreprises présente une grande hétérogénéité, voulue, afin de rendre l'étude la plus exhaustive possible. Dans les 5 tableaux qui suivent, il est possible de visualiser le tri effectué sur ce panel resserré.

Le Tableau 23 présente les entreprises à niveau de maturité I, soit faible, notées entre 0 et 3 points. Deux d'entre elles sont des entreprises de mécanique de haute précision et la troisième un centre de formation. Ces entreprises ne font pas de conception ni de production mécatronique. Cependant, Balland Gailleton affiche clairement son orientation vers la fourniture d'ensembles connexes et parle de la co-conception des produits complexes avec la clientèle. C'est une candidate qui peut en effet évoluer vers des niveaux plus élevés de maturité mécatronique.

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	Nom de la Petite et Moyenne entreprise Industrielle (PMI)	Activité	Localisation : ville et département
3	I	3	ENGRENAGE SERVICE - PMI	Fabrication d'engrenages et d'organes mécaniques de transmission.	39130 Bonlieu, Jura
2	I	3	BALLAND GAILLETON - PMI	Décolletage, ensembles et sous-ensembles, réalisation des produits complexes, co-conception avec la clientèle.	96120 Vaulx-en-Velin, Rhône
1	I	4	I.F.C. OLEOHYDRAULIQUE - PMI	Institut de formation en oléohydraulique.	77590, Bois-le-Roi, Seine-et-Marne

Tableau 23 : Entreprises à degré I de maturité

Le Tableau 24 présente les entreprises à maturité mécatronique moyenne notées entre 4 et 7 points.

L'activité de l'entreprise GNK Service France est relative au marché de réparation de l'automobile qui, lui, est fortement lié aux produits mécatroniques. Il n'est cependant pas possible de prétendre que l'entreprise GNK fait de la mécatronique pour autant. Repack's commercialise des joints dynamiques, l'activité qui a récemment rejoint le syndicat Artema, Hydro Applications se spécialise dans la maintenance hydraulique et Technifor Gravotech est un groupe qui travaille dans les solutions complètes de traçabilité.

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utiles à la mécatronique 5 = BE	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Localisation : ville et département
7	II	4	GKN SERVICE France - PMI	Arbres d'entraînement, réusinage, processus de traitement d'huiles usagées.	78560, Chanteloup les Vignes, Yvelines
7	II	3	REPACK'S - PMI	Commerce interentreprises : joints dynamiques, fournitures et équipements industriels divers, machines de marquage au laser.	71290 Cuisery, Saône-et-Loire
5	II	4	HYDRO APPLICATIONS - PMI	Spécialiste de la maintenance hydraulique, usinage de composants.	17140 Lagord, Charente-Maritime
7	II	1	TECHNIFOR GRAVOTECH GROUP	Solutions de marquage de traçabilité; solutions complètes de traçabilité.	69140 Rillieux-la-Pape, Rhône

Tableau 24 : Entreprises à degré II de maturité mécatronique

Le Tableau 25 présente 5 entreprises qui affichent une conception et production mécatronique. Elles ont également un bureau d'études multidisciplinaire et proposent des solutions sur mesure. Douce Hydro fait de la conception pour la gestion de solutions hydrauliques : amortisseurs viscoélastiques et systèmes de mesure intégrés, KTF France s'emploie à la miniaturisation d'attelages dans les systèmes de transmission, de freinage et de refroidissement à eau ou à huile, Kuhnke Pneumatic conçoit et fabrique des systèmes de contrôle industriels automatisés, Novium conçoit et produit des automatismes de contrôle des processus industriels pour ensembles ferroviaires, fait de la maintenance corrective ou préventive et remet en conformité des équipements embarqués, Serta France se spécialise dans l'hydraulique pour applications mobiles et conçoit et fabrique des vérins sur mesure, ADR possède un savoir-faire en ingénierie de conception et fabrique des actionneurs électromécaniques et opto-mécaniques. Appareils Transformation Vitesse produit des

embrayages électromagnétiques, Atlanta Neugart conçoit et produit des systèmes d'entraînement pour performance dynamiques pour le secteur de la robotique, Binder Magnetic produit des transmissions synchrones électromagnétiques, électromécaniques pour les écluses et Boisset et Compagnie propose des solutions sur mesure pour les réducteurs et multiplicateurs, Edel Tamp est une entreprise qui se lance dans la mécatronique en proposant des bornes automatiques et autres solutions sur mesure.

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utiles à la mécatronique 5 = BE	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Localisation : ville et département
11	III	1	DOUCE HYDRO - PMI	Conception et gestion de solutions hydrauliques: amortisseurs viscoélastiques, systèmes de mesure intégrés	80300 Albert, Somme
11	III	1	KTR France - PMI	Miniaturisation d'attelages dans les systèmes de transmission, de freinage, de refroidissement à eau ou à huile	69570 Dardilly, Rhône
11	III	1	KUHNKE PNEUMATIC - PMI	Systèmes de contrôle industriel, réalisation de systèmes automatisés	35530 Brécé, Ille-et-Villaine
11	III	1	NOVIUM - PMI	Conception, construction d'automatismes de contrôle des processus industriels pour ensembles ferroviaires, maintenance corrective ou préventive, remise en conformité des équipements embarqués.	71230 Saint-Vallier, Saône-et-Loire
11	III	1	SERTA France - PMI	Hydraulique pour applications mobiles, vérins sur mesure	85170 Le Poiré-sur-Vie, Vendée
10	III	1	ADR - PMI	Conception, fabrication d'organes mécaniques de transmission, actionneurs électromécaniques et optomécaniques.	77810 Thomery, Seine-et-Marne
10	III	1	APPAREILS TRANSFORMATION VITESSE - PMI	Mécanique industrielle, embrayages électromagnétiques.	78230 Le Pecq, Yvelines
8	III	1	ATLANTA NEUGART France - PMI	Systèmes d'entraînement pour performances dynamiques en robotique, autres produits spécifiques d'entraînement.	77127 Lieusaint, Seine-et-Marne
8	III	1	BINDER MAGNETIC - PMI	Transmission synchrones, électromagnétiques et électromécanique, électroaimants, équipement des écluses.	92263 Gennevilliers, Hauts-de-Seine
9	III	3	BOISSET ET COMPAGNIE (BCSA) - PMI	Réducteurs et multiplicateurs de transmission de puissance, bancs d'essai, BE, solutions sur mesure.	96120 Vaulx-en-Velin, Rhône
11	III	1	EDEL TAMP - PMI	Injection plastique : fonctions complètes, bornes automatiques, développement et production mécatronique.	7400 Annecy, Haute-Savoie

Tableau 25 : Entreprises à degré III de maturité mécatronique

Le Tableau 26 recense des entreprises mécatroniques affirmées. Ces entreprises ont une maturité mécatronique croissante et se sont vues attribuer entre 12 et 15 points.

Ainsi, dans le Tableau 26 se trouvent les entreprises Delta Equipement qui produit le moteur électrique, FP Hydraulique qui est une entreprise très intégrée et conçoit et produit des valves directionnelles, Harmonic Drive qui se spécialise dans la robotique et travaille dans l'automatisation et l'optimisation de produits, Fluidap qui propose des solutions globales pour les centrales hydrauliques avec des composants et systèmes hydrauliques tout en proposant des services de maintenance adapté également, Pneumax qui miniaturise des ensembles mécatroniques, Redex qui produit des ensembles mécatroniques complets d'entraînement. Mais également SM Cyclo France qui a rejoint le groupe Sumitomo produisant des gammes complètes d'engrenages et de servo et motoréducteurs, Voith Turbo qui est le fournisseur mondial de composants et de systèmes d'entraînement pour les systèmes d'automatisation, Hawe Otelec qui se spécialise dans le pilotage de systèmes complexes, Wittenstein qui se déclare mécatronique et produit des systèmes d'entraînement, de régulation et de pilotage d'une grande précision, Carmat qui est un centre de développement dans le biomédical et fabrique le cœur artificiel et Danfoss qui est dans le domaine de la mesure de température et de pression et enfin Indeeep, un bureau d'études multidisciplinaire qui conçoit des produits mécatroniques pour le compte du client et s'interface fortement avec ces derniers. Par ailleurs, le point commun de toutes ces entreprises est qu'elles conçoivent et produisent un produit mécatronique et qu'elles s'interfacent fortement avec leurs clients et fournisseurs.

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Localisation : ville et département
13	IV	1	DELTA EQUIPEMENT - PMI	Pneumatique, robotique, fluides, moteur mécatronique.	92252 La Garenne-Colombes, Hauts de Seine
12	IV	1	FP HYDRAULIQUE - PMI	Hydraulique sur mesure, valves directionnelles, maîtrise complète du processus de fabrication des produits en propre.	74311 Cluses, Haute-Savoie
12	IV	1	HARMONIC DRIVE - PMI	Robots flexibles : robotique, automatisation, optimisation de produits.	69100 Villeurbanne, Rhône
12	IV	1	FLUIDAP - PMI	Solutions globales, centrales hydrauliques, banc didactique, systèmes, composants hydrauliques, services de maintenance.	95310 Saint-Ouen-l'Aumône, Val-d'Oise
12	IV	1	PNEUMAX - PMI	Fabrication d'équipements hydrauliques et pneumatiques : multiplicateurs de pression, miniaturisation.	67600 Sélestat, Bas-Rhin
12	IV	1	REDEX - PMI	Ensembles mécatroniques complets : entraînement d'axes pré-chargés, machines pour laminage, construction mécanique.	45210 Ferrières-en-Gâtinais, Loiret
12	IV	1	SM CYCLO France - PMI	Gamme complète de mécanismes d'engrenages et de servo et motoréducteurs - (Groupe SUMITOMO 20 ent.)	77700 Serris, Seine-et-Marne
12	IV	1	VOITH TURBO - PMI	Mouvement contrôlé : systèmes d'automatisation, systèmes de contrôle de mesure et de commande, équipementier d'hydrocentrales.	93160 Noisy-le-Grand, Seine-Saint-Denis
12	IV	1	HAWE OTELEC - PMI	Applications hydrauliques dans le mobile, pilotage automatique de systèmes complexes.	91250 Tigery, Essonne
12	IV	1	WITTENSTEIN - PMI	Technologie mécatronique de propulsion : permet d'entraîner, de piloter ou de réguler avec une précision maximale.	9650 Eaubonne, Val-d'Oise
12	IV	2	CARMAT-PMI	Cœur artificiel : biomatériaux de pointe ; médecins et ingénieurs hautement qualifiés.	78140 Vélizy-Villecoublay, Yvelines
12	IV	1	DANFOSS - AUTRE	Mesure de température et de pression : vannes proportionnelles, contacteurs électroniques, contacteurs et des micro-démarrateurs.	78990 Élancourt, Yvelines
15	IV	5	INDEEP - PMI	Systèmes électroniques pour accroître les performances et la valeur ajoutée des produits ; en logiciel embarqué ; en système.	74960 Cran-Gevrier, Haute-Savoie

Tableau 26 : Entreprises à degré IV de maturité mécatronique

Pour terminer, le Tableau 27 présente les 2 entreprises à degré V de maturité très élevée. Une grande entreprise y figure : Schneider Electric, qui est l'une des leaders en matière de mécatronique et une entreprise de taille intermédiaire NTN-SNR qui affiche systématiquement la mécatronique.

On a également pu observer, que certaines des entreprises de rang III, IV et V ont incorporé, à un moment ou un autre, un leader, « un homme ou femme orchestre » issu(e) de métiers différents de celui de base de l'entreprise qui de par son expérience a su donner une impulsion différente et apparemment payante à l'entreprise. Cette expérience lui confère un rôle visionnaire et déterminant quant à l'intégration de l'informatique des systèmes embarqués par exemple et à l'augmentation de compétences de son entreprise relativement à la mise en pratique de systèmes multi-physiques.

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	Nom de l'entreprise	Activité	Localisation : ville et département
19	V	1	SCHNEIDER ELECTRIC - Grande Entreprise	Disjoncteurs mécatroniques.	38000 Grenoble, Isère
17	V	1	NTN SNR - ETI (Entreprise de Taille Intermédiaire)	Mécatronique : roulements, paliers, guidages linéaires, gamme maintenance.	74010 Annecy, Haute-Savoie

Tableau 27 : Les entreprises à degré V de maturité mécatronique très élevée

Le concept de servicisation est étudié et travaillé depuis les années 1990 dans la littérature managériale en théorie des organisations. Une étude de 11 cas industriels allemands qui fait référence depuis, définit les dimensions qui doivent être prises en compte pour réussir la mise en place des services dans une entreprise industrielle. Elle est visible dans le Tableau 28. Ces dimensions sont : les facteurs déclencheurs, les buts poursuivis et les actions à mettre en place pour y arriver (Oliva and Kallenberg 2003).

1	2	3	4	5
<i>Consolidation de services relatifs aux produits</i>	<i>Prestations de services après-vente</i>	<i>Offre de services personnalisée</i>	<i>Offre de services relatifs aux processus</i>	<i>Prise en charge des opérations du client ou de l'utilisateur</i>

Tableau 28 : Les étapes de développement de services pour accompagner les produits industriels

Dans l'hypothèse où les produits mécatroniques conduisent à la mise en place de solutions de services, l'aspect de la servicisation est pris en compte, adapté et discuté dans les Chapitres 3 et 4.

Pour l'ensemble de ces 33 entreprises, le chiffre d'affaires (CA) était disponible ce qui a permis d'amorcer une analyse de la performance.

Même si le CA est un indicateur de la performance encore largement utilisé pour témoigner de la performance d'une entreprise, cette dernière est un concept multidimensionnel dont la représentation doit être explicitée avant même de la mesurer. Dans le Tableau 29 sont visibles plusieurs définitions de la performance.

<i>« La performance est un concept et on ne mesure pas les concepts, on les représente ».</i>	(Escaffre 1999)
<i>L'image fidèle de la performance n'est pas unique car « l'indestructible subjectivité des lecteurs joue son rôle ».</i>	F. Pascualini (1991) dans (Escaffre 1999)
<i>« Est performant celle/celui, individu ou organisation, qui atteint ses objectifs ».</i>	M. Lebas, revue française de comptabilité, août 1995 dans (Alazard and Sépari 2007)
<i>La performance traduit une dynamique, « la performance globale est la somme de performances locales (...) » - pilotage par les processus et compétences.</i>	(Lorino 2003)
<i>La performance est « l'agrégation des performances économiques, sociales et environnementales ».</i>	(Baret, 2006) dans (Renaud and Berland 2007)

Tableau 29 : Définitions de la performance

Dans l'hypothèse où il faut s'organiser d'une façon optimale pour faire de la mécanique, la définition la mieux adaptée pour notre étude est celle proposée par M. Lebas « *Est performante celle/celui, individu ou l'organisation, qui atteint ses objectifs* ».

Cette multi-dimensionnalité de la performance est donc la conséquence du fait de poursuivre des buts multiples évaluables à plusieurs niveaux. A titre d'exemple, pour la production, ce peut être l'amélioration constante de la productivité par un rendement accru et un niveau élevé de la qualité ; pour la vente ce peut être la compétitivité par la maîtrise des coûts ; pour la finance, la rentabilité peut être donnée par la formule fondatrice du contrôle de gestion qui est le taux de profit qui égale le taux de marge multiplié par la rotation du capital ou par la somme agrégée d'autres indicateurs jugés pertinents.

Le concept de la performance est intrinsèquement lié à la notion de valeur (Tableau 30) qui, dans ce cas-là, ne peut plus égaler uniquement le prix de vente diminué du prix de revient qui est la définition du chiffre d'affaires dans un bilan comptable. La valeur totale est alors égale à la valeur conjointe issue du produit et de l'entreprise. Reste à savoir quels processus spécifiques contribuent ainsi à la définition d'une entreprise « mécanique ».

<i>Valeur = produit + entreprise</i>	M. Lebas, revue française de comptabilité, août 1995 dans (Alazard and Sépari 2007)
<i>Valeur = « (...) appréciation subjective et fluctuante par la demande de l'utilité apportée par les fonctions d'un produit. »</i>	

Tableau 30 : Définition de la valeur

Aujourd'hui, la notion de la valeur dépasse son sens économique premier. Autrement dit, la valeur ne s'obtient pas uniquement par la transformation de matières premières en produits et ne se limite pas non plus à la notion de valeur ajoutée. Elle découle de toutes les activités principales et de soutien d'une organisation. Cette approche d'agrégation de compétences organisationnelles est admise depuis la mise en

évidence de la notion de « chaîne de valeur » définie ainsi par (Porter and Millar 1985). Sa représentation sera visible dans la Figure 14.

En effet, la valeur concerne le produit et l'entreprise. Cette dernière devient donc multidimensionnelle et sa performance doit également se mesurer de façon multidimensionnelle comme argumenté par (Lorino 2003) qui établit des méthodes et pratiques de performance pour un pilotage par les processus et les compétences.

Le fait est que les produits mécatroniques apportent de nouvelles fonctions et par ce biais, ils apportent également de la valeur et contribuent à l'augmentation de la performance de l'entreprise. Et réciproquement, si l'entreprise, pour produire ses produits fonctionnels doit s'organiser par la mise en place de processus spécifiques qui soutiennent le fait de fabriquer ces produits multifonctionnels, ces processus font partie de la définition de la valeur globale de l'entreprise mécatronique. De ce fait, l'un comme l'autre présentent des leviers importants à la définition de la performance mécatronique. Ces leviers sont explicités et approfondis dans les chapitres 3 et 4.

L'aspect de la performance mécatronique globale quant à elle est abordée dans les perspectives de la discussion qui clôt ce travail de thèse.

1.4. Conclusion

Après avoir présenté, dans l'introduction, le contexte et la problématique globale, le premier chapitre rend compte des approches méthodologiques utilisées pour aborder la problématique et présente les critères utilisés pour la constitution du panel et les différents tris effectués sur ce dernier.

A l'issue de ce chapitre, une première caractérisation de l'entreprise « mécatronique » peut être proposée. Elle est visible sur la Figure 5.

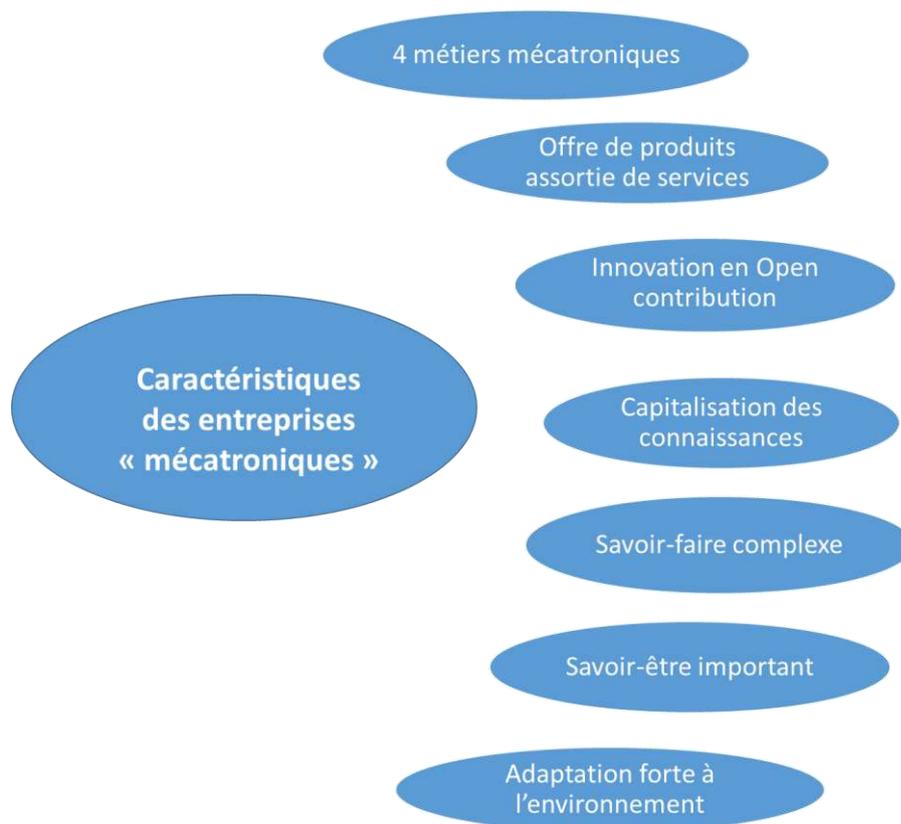


Figure 5 : Première caractérisation de l'entreprise mécatronique

La base de données constituée permet de classer les entreprises selon ces critères avec une note qui va de 0 à 19 points au maximum. Cette base a permis de définir d'une manière plus objective l'échantillon d'entreprises à enquêter. Les orientations pour la suite de la recherche ont pu être posées et notamment par les différents tris faits sur l'échantillon de base (179) et surtout celui resserré (33).

A partir de cette première analyse, on retiendra que la maturité dans la mécatronique est corollaire de différents critères : il faut intégrer des métiers différents (en particulier l'informatique embarquée), avoir une offre de produits et de services, mener des innovations avec une contribution ouverte et donc capitaliser sur des connaissances. Les entreprises relevant de cette typologie ont un très haut savoir-faire qui porte sur des processus complexes et repose sur un savoir-être important ; elles s'adaptent fortement aux environnements et donc aux marchés tout en intégrant des « hommes ou femmes orchestre » qui de par leurs expériences dans le domaine de l'informatique et des systèmes embarqués ainsi que par leur pratique des systèmes multi-physiques leur donnent des impulsions nécessaires pour amorcer et conduire des changements.

Plusieurs questions se sont posées à ce stade. (1) Quelle organisation globale répond au mieux à la performance affichée des entreprises championnes ? (2) Les petites et moyennes entreprises de la filière mécanique traditionnelle ont-elles un long chemin à parcourir avant d'acquérir une maturité dans le domaine mécatronique ? (3) Peut-on se représenter les différences entre les entreprises mécaniques traditionnelles et les championnes en matière de compétences organisationnelles, par exemple ?

Les informations collectées auparavant sont mises en parallèle avec les concepts académiques et une restitution des résultats obtenus effectué sur l'ensemble des 33 entreprises du panel resserré est également donnée. Le Chapitre 2 suivant permet donc d'apporter ces éclairages organisationnels supplémentaires.

2. Chapitre 2 - Quel type d'organisation est le plus à même de mettre en évidence la spécificité mécatronique ?

2.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, la méthode adoptée pour cette recherche a été présentée et détaillée. A l'aide de la première classification et avec le concours des spécialistes en mécatronique, il a été possible de dégager les caractéristiques principales et visibles de ce que l'on appelle les champions mécatroniques.

Afin de mettre en lumière l'écart entre ces entreprises ayant aujourd'hui une importante maturité en matière mécatronique et les candidates à la mécatronique, on propose, dans ce chapitre, de mesurer la distance que ces dernières ont, a priori, à parcourir avant d'acquérir la maturité des premières. Pour ce faire, on étudie tout d'abord les 33 entreprises de l'échantillon resserré sous un angle conceptuel et organisationnel à l'aide du méta-modèle de Mintzberg pour lequel on propose un algorithme qui permet cette mesure.

Enfin, ce chapitre correspond à la phase du prétest qui, rappelons-le, équivaut au point de stabilisation de la problématique, où l'on peut proposer les orientations pour la suite de la recherche. Concrètement, il s'agit de proposer le modèle de recherche, qui permet d'illustrer les parties étudiées et les liens que l'on va étudier entre ces parties afin d'apporter des réponses à la question de recherche globale suivante :

« Par quels moyens objectifs et reproductibles les petites et moyennes entreprises traditionnelles mécaniques du secteur de décolletage mécaniques peuvent-elles être aidées lorsqu'elles choisissent de s'engager dans la conception et production mécatroniques ? »

Ce modèle de recherche qui établit le lien entre le produit et l'organisation est donné en fin de Chapitre 2 et sera visible sur la Figure 25.

Afin de répondre aux objectifs visés dans ce chapitre, ce dernier est organisé comme suit : tout d’abord, on explique la motivation qui a conduit à la contraction de l’échantillon d’entreprises à étudier. On expose ensuite les contraintes méthodologiques relatives à la recherche d’étude de cas (cf. saturation théorique). Les concepts du fit stratégique et de complexité organisationnelle sont présentés préalablement à l’outil de mesure, le méta-modèle de Mintzberg. Ensuite, la méthode de codage utilisée et l’algorithme pour son opérationnalisation sont présentés. Enfin, les résultats sont donnés.

2.1.1. La contraction de l’échantillon

Tout d’abord, et pour répondre à la question comment ces entreprises qui ont développé des compétences en mécatronique, se positionnent sur le marché mécatronique, l’échantillon a été resserré sur 33 entreprises.

A première vue, les entreprises atteignant le niveau de maturité III, IV, V et plus sont celles qui se positionnent sur le marché de la mécatronique par un CA égal ou dépassant les 100 000 euros par personne employée. D’après les spécialistes⁹ de la mécatronique et les comptables consultés, ce chiffre est suffisant pour dire que l’entreprise atteignant ces taux, « sait monnayer des innovations » si l’on se réfère à (Van de Ven 1986). On observe que 29 entreprises sur 33 de l’échantillon resserré se situent au-dessus de cette limite (voir Tableau 31) dont 25 qui font effectivement des produits mécatroniques.

Degré de performance	0	I	II	III	IV	V	>V
Pondération CA/TAILLE k€	0	De 0 à 29,99	De 30 à 59,99	De 60 à 89,99	De 90 à 119,99	De 120 à 149,99	>=150
Nombre d’entreprises	1	0	2	1	4	22	3

Tableau 31 : Positionnement de 33 entreprises observées par rapport au marché

Afin d'éviter l'amalgame avec des entreprises intégrant des processus de management évolués comme par exemple le lean management, la logistique complète ou la Responsabilité Sociétale des Entreprises, il a fallu déterminer quelle organisation globale répond au mieux à cette performance (voir définition Tableau 29) , où les produits très fonctionnels apportent de la valeur et contribuent ainsi à l'augmentation de la performance de l'entreprise. Cette dernière est, en même temps, obtenue apparemment par un mélange de compétences diversifiées et complexes comme vu dans le Tableau 18 et Tableau 19.

Les spécialistes consultés nous ont appris que les champions mécatroniques sont des organisations qui, d'une part savent concevoir, produire et bien vendre les produits mécatroniques et d'autre part, réussissent à s'adapter aux marchés, à innover constamment en matière de produits et services et, de plus, à intégrer des processus de support innovants comme vu dans le Tableau 12. En prenant en compte ces avis et les observations faites sur le panel initial (voir Tableau 64), nous avons émis l'hypothèse de travail qu'il s'agit d'organisations complexes. Nous allons donc présenter les différents concepts relatifs à la complexité.

Dans la partie suivante, le concept de complexité est tout d'abord lié à celui du fit stratégique, étudié en théorie des organisations depuis (Chandler 1962) qui soulève déjà la problématique du changement organisationnel lié à l'environnement changeant. Il observe sur une base inductive (définition disponible dans le Tableau 4) que les organisations qui réussissent sont celles dont la stratégie, la structure organisationnelle et les processus managériaux sont adaptés les uns aux autres. La stratégie dicte donc la forme organisationnelle et non pas le contraire. Le concept du fit¹⁰ stratégique est né.

¹⁰Le fit stratégique : cohérence entre la stratégie, la structure organisationnelle et les processus managériaux adoptés (Chandler, 1962). "(...) a firm's strategy, its structure, and its managerial processes have to « fit » with one another." Chandler (1962) dans (Milgrom and Roberts 1995)

2.1.2. Le concept du fit stratégique

Depuis le texte sur « La stratégie et la structure » de (Chandler 1962), les gestionnaires abordent la problématique du fit stratégique avec beaucoup d'enthousiasme et d'intuition. Mais ce n'est que depuis la théorie des complémentarités de Milgrom et Roberts (1990 ; 1995) qu'il y a une formalisation du concept qui s'appuie sur la théorie des systèmes ouverts (Parsons, 1951 ; Katz, Kahn, 1978), à savoir qu'il est plus avantageux de procéder en synergie que d'effectuer des changements aléatoires. Ils font ainsi évoluer les théories économiques de la firme qui ont longtemps soutenu que tout est régi par les marchés¹¹.

C'est en observant le terrain et en s'appuyant sur des théories économiques existantes pour l'étude des stratégies de marchés que (Milgrom and Roberts 1990) finissent par répondre au défi lancé par leurs confrères (Piore and Sabel 1986) pour expliquer les changements paradigmatiques induits par les équipements technologiques flexibles¹² au niveau de la firme : les anciens modèles de production de masse (spécifiques et rigides) sont ainsi remplacés par la vision d'une firme flexible à multi-produits qui souligne l'importance de la qualité et une réponse rapide aux marchés (clients) et nécessite la proposition de nouvelles formes organisationnelles.

Concrètement, Milgrom et Roberts proposent qu'il ne suffit pas d'effectuer quelques changements dans seulement quelques activités sporadiques mais d'élargir ces changements à l'intérieur de plusieurs groupes d'activités. En observant les milieux industriels (et la presse des affaires), ils sont marqués par le fait que le succès n'est pas dû aux petits changements isolés à différents niveaux mais systématiquement à des changements conséquents et étroitement coordonnés avec l'ensemble des

¹¹ L'organisation n'est plus seulement une réponse aux défaillances des marchés (Arrow 1974) ou intégratrice de la spécificité et de la décision de « make or buy » (Williamson 1975) ; ils jettent un nouvel éclairage sur les théories contractuelles (Alchian and Demsetz 1972) et les comportements opportunistes qui les régissent (Klein and Leffer 1981).

¹² Equipements flexibles à faible coût de changements de réglages (voir également [Annexe n° 3](#))

activités de la firme. Pour une explication plus détaillée, le lecteur pourra consulter les concepts liés à l'organisation moderne et flexible dans [l'Annexe n° 3](#).

Leur terrain de recherche est l'économie japonaise dont la performance depuis les années 1945 est remarquable : ils s'intéressent donc aux contenus de différentes organisations de l'économie japonaise sous 5 angles différenciateurs : la politique RH, la gouvernance et la gestion de la propriété, la politique de production, les attributs de la stratégie d'entreprise et leur lien à l'environnement socio-économique (Milgrom and Roberts 1994).

	Entreprise moderne et flexible	Entreprise traditionnelle
Milgrom Roberts 1990	Les 9 pratiques différenciatrices	
a	Production par lots et ciblé	Production d'échelle
b	Améliorations de produits et de processus fréquentes	Améliorations rares
c	Ciblage et segmentation de marchés	Marketing de masse peu ciblé
d	Travailleurs hautement qualifiés aux compétences transversales	Main d'ouvre peu qualifiée
e	Gouvernance: Processus de décision décentralisés	Gouvernance: verticale
f	Accent mis sur la qualité	Accent mis sur le volume
g	Peu de stocks	Stocks élevés
h	Grande réactivité à la demande client	Faible réactivité à la demande client
i	Confiance aux fournisseurs (intégration)	Fournisseurs peu intégrés

Tableau 32 : La différence entre entreprise moderne et flexible et traditionnelle Adapté de (Milgrom and Roberts 1995)

Cette recherche inductive à partir du terrain observé leur permet de proposer une nouvelle théorie de la firme moderne qui se différencie de l'ancienne par une production flexible, une réponse rapide à la demande qui privilégie l'économie de gammes et mise sur les compétences ou métiers de base (Milgrom and Roberts 1990).

Ils la modélisent¹³ par rapport aux 9 pratiques différenciatrices trouvées entre l'entreprise traditionnelle et moderne et flexible (Tableau 32). En essayant de comprendre la raison pour laquelle les firmes qui réussissaient à maximiser leurs profits adoptent des stratégies qui leur permettent d'exploiter des complémentarités, Milgrom et Roberts posent ainsi les fondements de la théorie de la firme moderne exploitant la complémentarité de ressources.

2.2. Le concept de complexité organisationnelle

2.2.1. Evolution des formes organisationnelles dans le temps

Dans une revue de littérature managériale proposée par (Shane and Ulrich 2004) l'innovation relative aux produits complexes et progressivement connectés, est décelable progressivement depuis les années 1954 sous les thématiques dédiées à la R&D, à l'innovation, au développement de nouveaux produits et à l'entrepreneuriat.

Ce travail de thèse adopte l'approche qui consiste à proposer un cadre évolutif des systèmes d'organisation en partant des organismes simples vers les formes complexes (Aïm 2016), (Mintzberg 1980), (Mintzberg 1989), (Miles and Snow 2007) combinant aujourd'hui produits et services (Product Service Systems), (Oliva and Kallenberg 2003). La configuration la plus élémentaire se trouve dans l'organisation entrepreneuriale où l'ensemble des opérations sont réalisées dans un cadre centralisé. Au fil du temps, la firme se complexifie et la création d'activités fonctionnelles pousse l'organisation à créer plusieurs unités dédiées et donc fonctionnelles. Ces unités fonctionnelles (par exemple le marketing, la R&D, etc.) tendent vers une normalisation progressive et rentrent dans ce que (Mathews and Coleman 1997) désignent de période économique de « standardisation » héritée de la révolution industrielle de la fin du 19^{ème} siècle. Les structures fonctionnelles centralisent et hiérarchisent des activités de gestion et la croissance de la firme est assurée par les avantages que

¹³ Le concept de modèle doit être compris selon la définition de Kaplan (1964) ou un système A est un modèle du système B si l'étude de A est utile à la compréhension de B sans qu'il y ait un lien causal direct entre A et B (Thiétart and Coll. 2007).

confèrent les économies d'échelle selon une production de masse. On peut synthétiser cette période, depuis le début du 20^{ème} siècle et allant jusqu'aux années 1950 environ, comme celle adoptant un mode de fonctionnement hiérarchique. Avec l'arrivée de la concurrence, la demande se modifie et les organisations doivent se diversifier et s'adapter aux opportunités commerciales nouvelles. La période de la « personnalisation » apparaît aux Etats-Unis dès les années 1950 et se caractérise par la mise en place de gammes de produits spécialisés (Mathews and Coleman 1997) qui précède la forme organisationnelle cellulaire. Au niveau organisationnel il y a création de divisions pour se rapprocher de marchés différents. Cette période de « personnalisation » continue son chemin avec l'apparition de la structure matricielle qui combine des économies d'échelle et de gamme. Elle est définie comme une structure ayant des divisions et dont le pouvoir reste en même temps centralisé dont l'avantage est de combiner la production de masse et la production personnalisée. De plus, elle s'adapte à un grand nombre de marchés différents.

Enfin, la période contemporaine de l'innovation voit proliférer les organisations qui se forment en réseaux. Le contexte est celui d'économie du savoir qui se nourrit de la production et de la vente de biens technologiques et vise des marchés hyperspécialisés. La durée du cycle de vie de produits se raccourcit (Mintzberg and Westley 1992) et les firmes les plus compétitives adoptent des stratégies en juste-à-temps ou des systèmes manufacturiers flexibles permettant une faible hiérarchisation de la gestion. En adoptant une gestion par les projets, la rigidité de l'intégration verticale peut être évitée. Ainsi la source principale de croissance économique est détenue par les organisations qui favorisent la coopération et l'échange d'informations par le biais de réseaux.

Dans l'esprit de la théorie de la contingence en commençant par Burns et Stalker, (1961) et en passant par Lawrence et Lorsch (1967) (Mccombs, Srinivasan, and Haunschild 2007) considèrent que ces changements induits correspondent à l'effort d'adapter l'entreprise à un certain type d'environnement. Ce dernier peut être caractérisé selon l'intensité de deux paramètres que sont la complexité et l'instabilité de l'environnement. Une représentation de ces notions est visible dans [l'Annexe n°8](#).

Cette évolution historique des formes organisationnelles est restituée par la typologie de Mintzberg (Mintzberg 1980). Il définit l'organisation en tant que « constellation multi-

dimensionnelle » de composantes, caractéristiques et dimensions conceptuellement distinctes se manifestant ensemble. Son approche holistique lui permet de dégager des « ensembles cohérents » qui ont une sorte de tendance naturelle à la formation d'agencements harmonieux (Mintzberg 1980). Dans son postulat de la théorie des configurations organisationnelles ou « recette de base », pour être efficace et d'atteindre ses objectifs, donc être performante, l'organisation tend vers une seule configuration type où une partie de l'organisation l'emporte sur les autres (voir Figure 6). L'organisation adopte un processus de coordination unique ou prédominant, un paramètre de structuration l'emporte sur les autres, un dispositif de liaison prime et l'on choisit la centralisation voire la décentralisation ou encore la déconcentration du pouvoir (Mintzberg 1980).

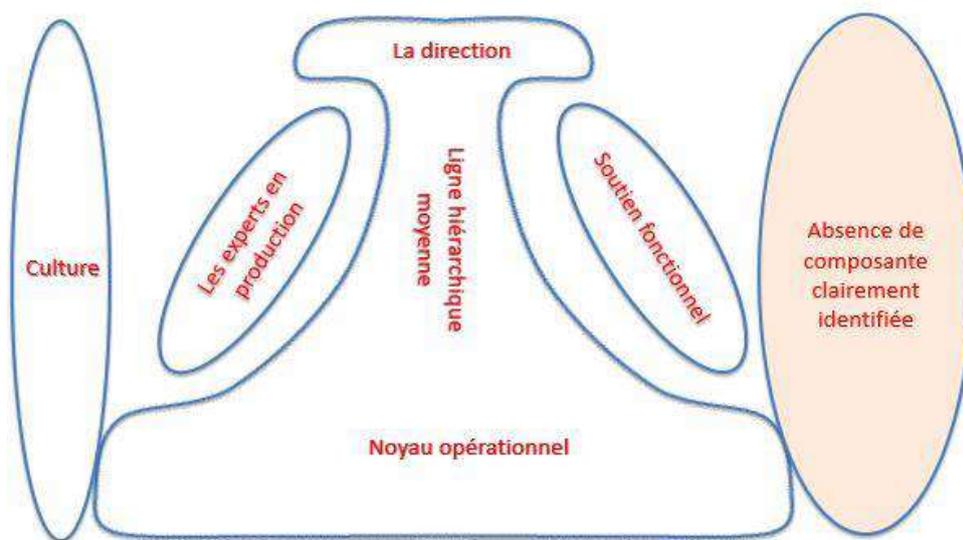


Figure 6 : Les composantes de base de l'organisation, adapté de (Mintzberg 1980)

Afin d'apporter plus de clarté, nous avons remplacé « Sommet stratégique » de Mintzberg par « la direction » et la « technostructure » de Mintzberg par « les experts en production ».

Il identifie également sept formes organisationnelles extraites de l'analyse bibliographique¹⁴ et de sa propre expérience cumulée dans la recherche sur l'administration des entreprises. Il identifie cinq composantes organisationnelles à partir desquelles se structurent les organisations, visibles dans la Figure 6 et cinq processus de coordination des activités qui sont : les processus de coordination ou le management adopté (I), les paramètres de structuration qui sont relatifs à l'adoption des processus (II), les dispositifs de liaison qui sont relatifs aux interactions ou flux d'échanges (III) et enfin la gestion du pouvoir qui est retenu à chaque fois par une composante différente (IV).

Dans le paragraphe suivant, on trouve ces 5 groupes de caractéristiques schématisées dans les figures allant de Figure 7 à Figure 13 et la Figure 15. Elles illustrent respectivement les parties prédominantes pour chacune des 8 différents types d'organisations ainsi que les différents processus de coordination (marqué I), de paramètres de structuration (marqué II), de dispositif de liaison (marqué III) qu'elles adoptent ainsi que les composantes où le pouvoir est détenu (marqué IV).

¹⁴ Un récapitulatif proposé par Mintzberg est visible dans le Tableau 66 de [l'Annexe n° 2](#) traduit par nos soins et le détail de son postulat avec les métiers qui rentrent dans le cadre de chaque composante peut être lu dans [l'Annexe n° 4](#).

2.3. Les types d'entreprises schématisées

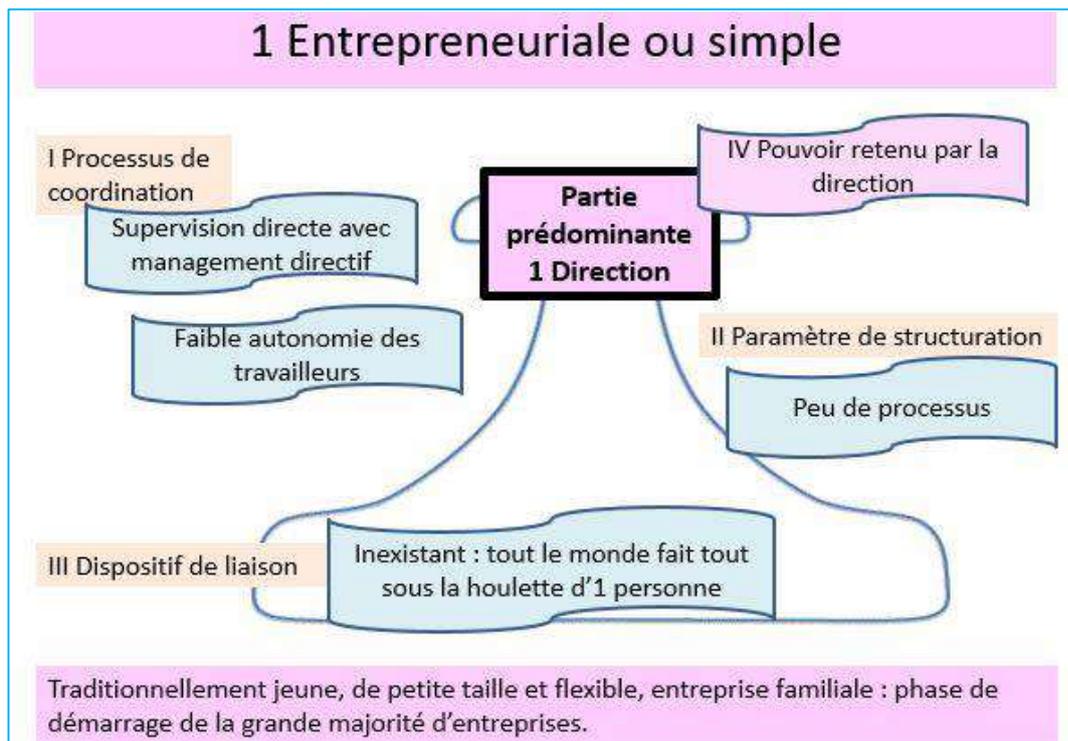


Figure 7 : Configurations organisationnelles : 1 Entrepreneuriale ou simple

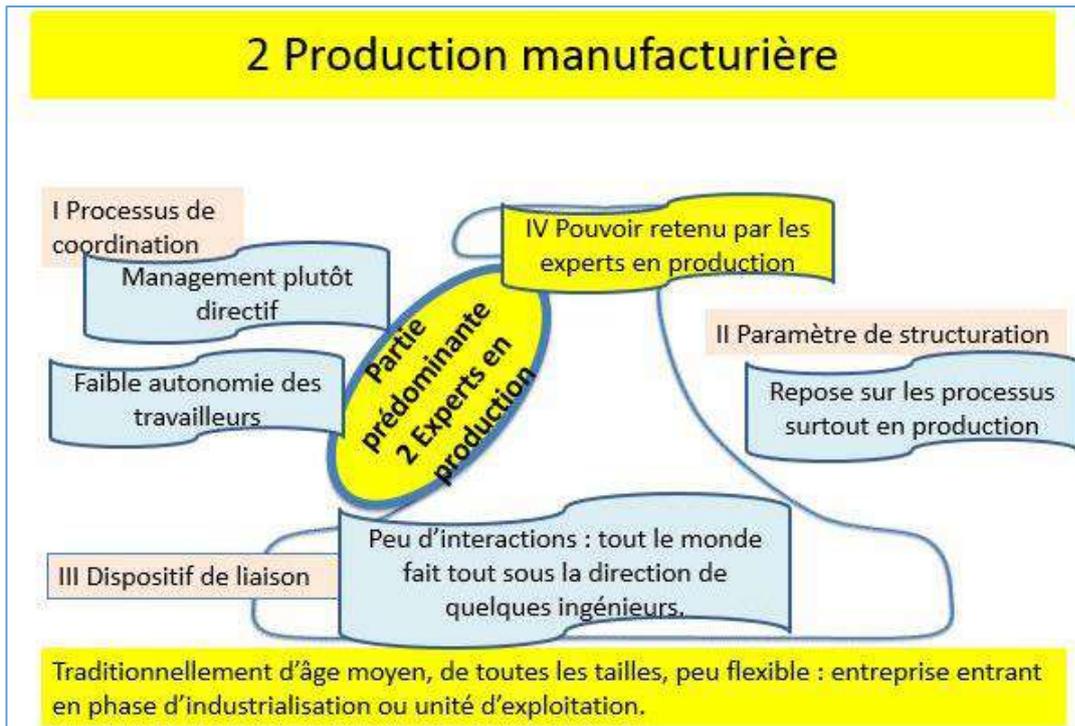


Figure 8 : Configurations organisationnelles : 2 Production manufacturière

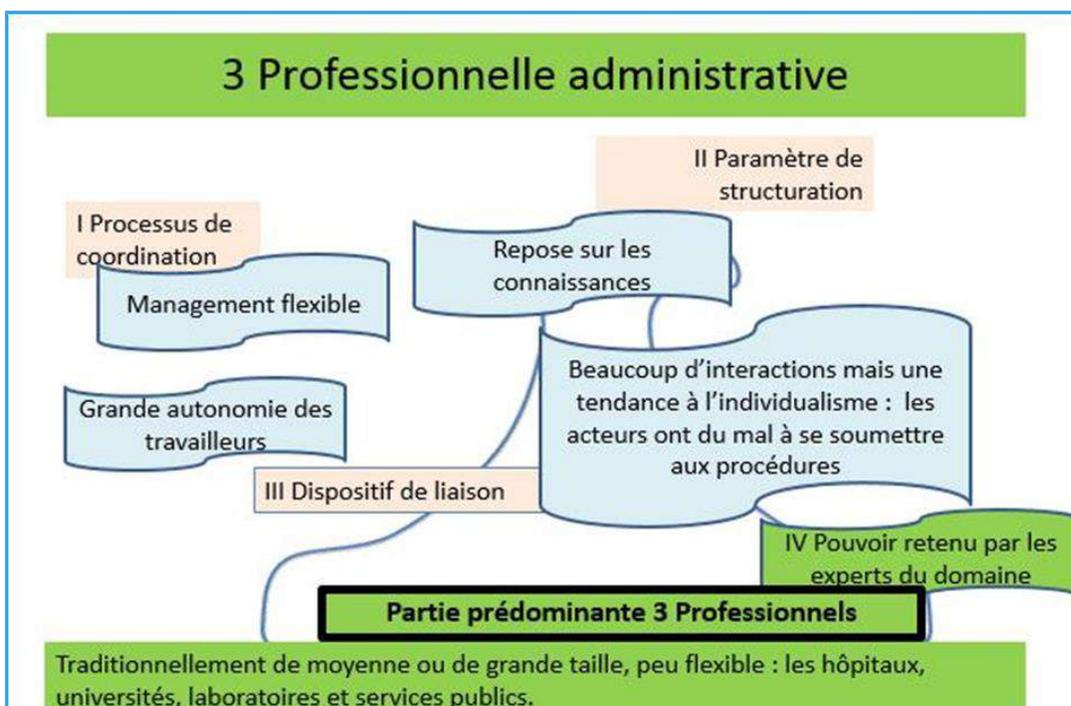


Figure 9 : Configurations organisationnelles : 3 Professionnelle administrative

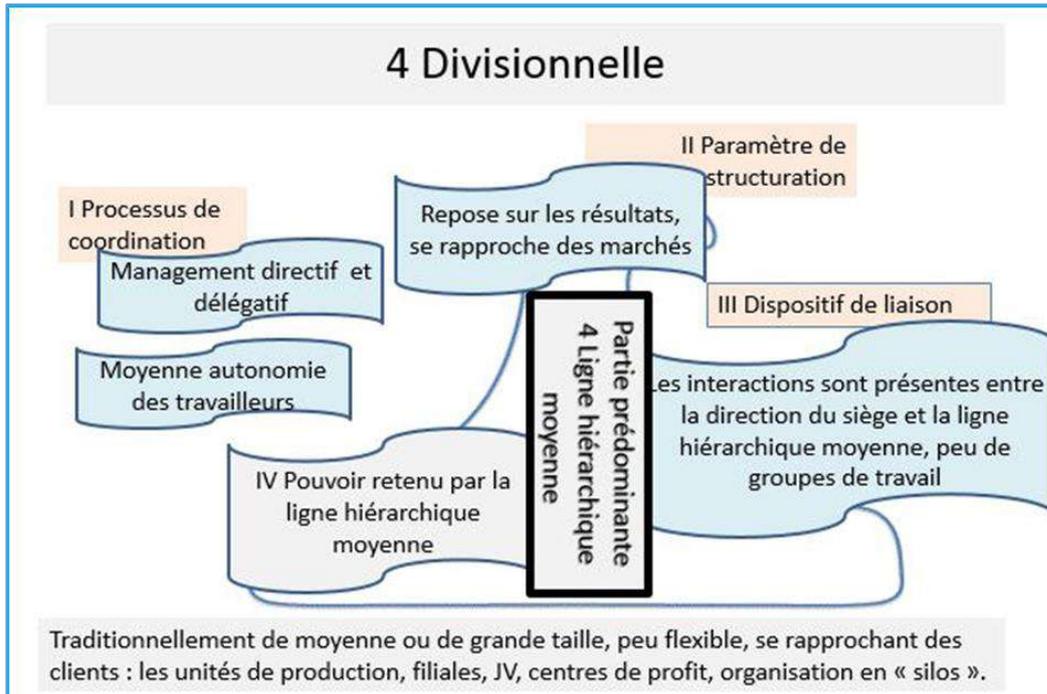


Figure 10 : Configurations organisationnelles : 4 Divisionnelle

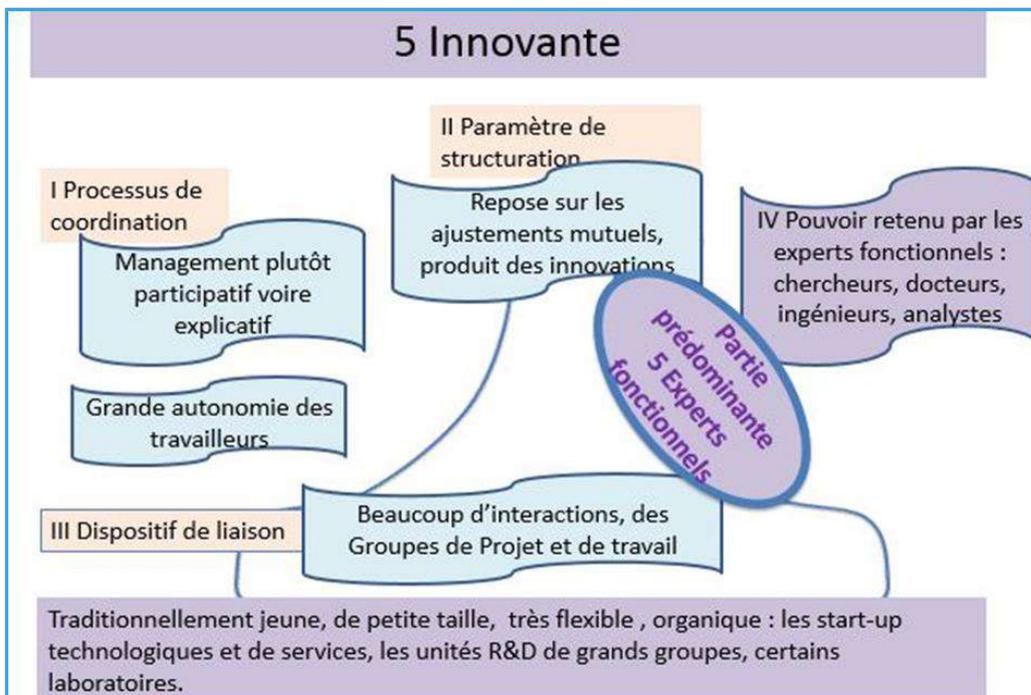


Figure 11 : Configurations organisationnelles : 5 Innovante

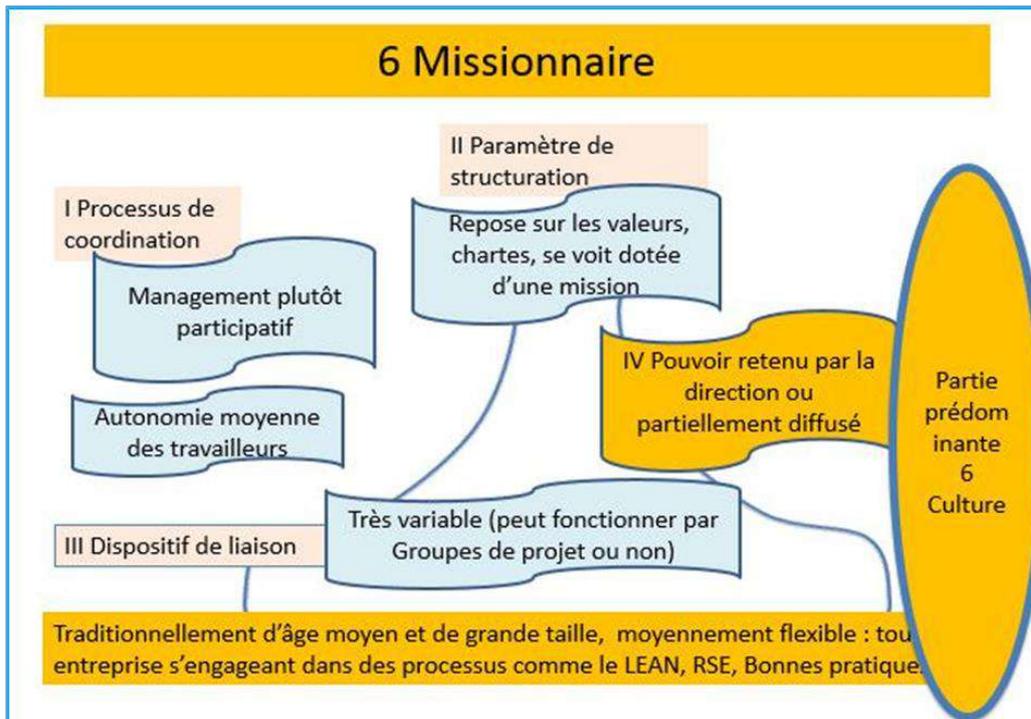


Figure 12 : Configurations organisationnelles : 6 Missionnaire

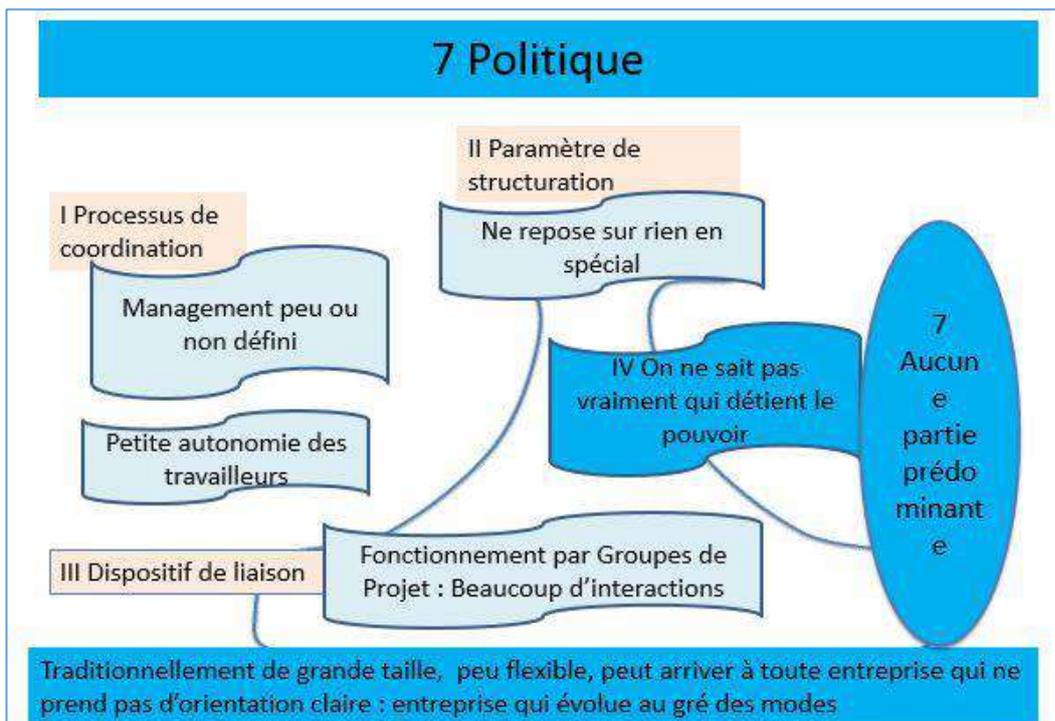


Figure 13 : Configurations organisationnelles : 7 Politique

Ces différentes configurations ne sont donc pas le fruit du hasard, elles sont motivées par des outils adaptés à chaque structure. On présentera la proposition de ces outils pour les Petites et Moyennes Entreprises en fin de ce chapitre.

2.3.1. Différentes structures, différents modèles d'affaires

D'après Mintzberg, la plupart d'entreprises adoptent « toutes ces configurations au cours de leur vie » : dans la première configuration, l'entreprise cherche à déterminer et stabiliser son marché. Dans la deuxième, elle se lance dans la vente de produits à grande échelle ; dans la troisième, elle prend à cœur la spécialisation et peut attaquer les marchés plus spécifiques. Dans la quatrième, elle se rapproche d'autres marchés en créant des succursales pour profiter de ces excédents qui, en retour, lui permettent de futurs investissements. Dans la cinquième configuration, elle opte pour l'élargissement de ses compétences en R&D et s'oriente vers les innovations. Dans la sixième, elle introduit fortement les processus managériaux et dans la septième, elle n'a pas d'orientation claire ce qui peut s'avérer fatal.

Mintzberg établit ainsi le lien entre le fit stratégique¹⁵, à savoir, la cohérence entre la stratégie, la structure organisationnelle et les processus managériaux adoptés soit la performance supportée par la forme (voir les définitions de la performance dans le Tableau 29) et ébauche un premier lien vers le modèle d'affaires qui se dessine ainsi pour ces 7 entreprises type schématisées précédemment.

La dernière forme organisationnelle que nous présentons dans ce chapitre et qui est en quelque sorte l'aboutissement des précédentes, repose également sur la notion de chaîne de valeur. Cette dernière a été identifiée par (Porter and Millar 1985) et liée au concept de performance et de valeur (voir Tableau 29 et Tableau 30), visible dans la Figure 14.

¹⁵ Le fit stratégique : cohérence entre la stratégie, la structure organisationnelle et les processus managériaux adoptés (Chandler, 1962).

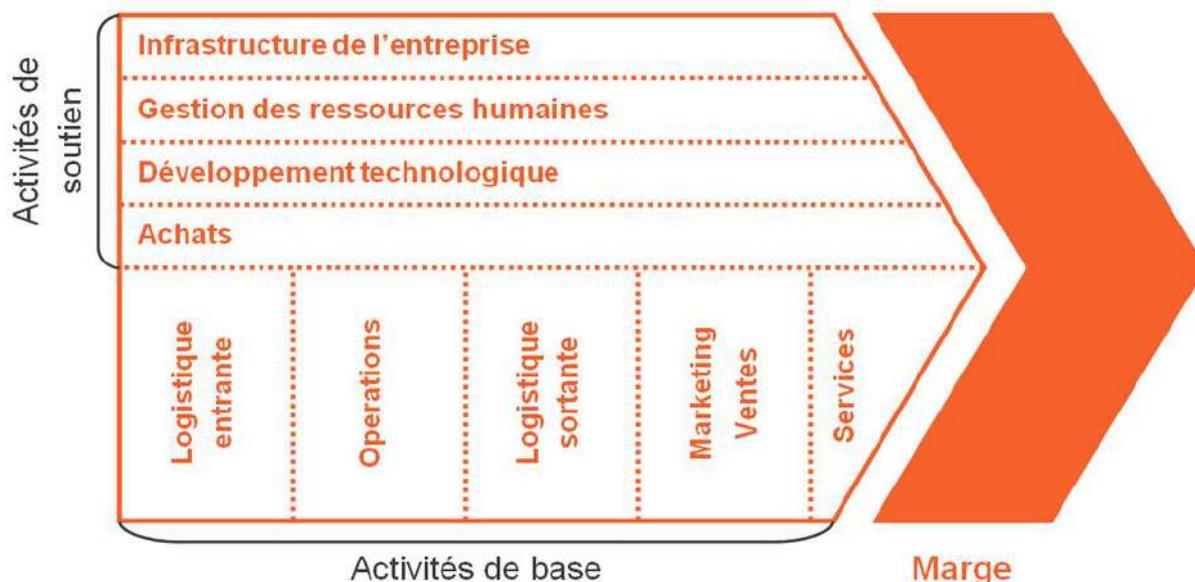


Figure 14 : La prise en compte des activités de base et de soutien dans l'analyse de la chaîne de valeur pour définir la valeur globale de l'entreprise Source image : <http://www.actinnovation.com/innobox/outils-innovation/analyse-chaîne-de-valeur>

La forme organisationnelle qui se structure autour de cette chaîne de valeur, c'est-à-dire, qui combine activités de base avec les activités de soutien, est l'organisation moderne et flexible¹⁶ désignée ainsi par Milgrom et Roberts.

Elle a été adaptée et schématisée selon les critères de Mintzberg. Sa représentation est donnée dans la Figure 15 de la partie suivante.

2.3.2. Le modèle de l'organisation moderne et flexible utilisée pour évaluer les compétences organisationnelles de l'entreprise définie a priori comme mécatronique

La représentation schématisées de l'entreprise moderne et flexible dans l'esprit de Mintzberg est visible dans la Figure 15. Elle est souvent appelée d'ambidextre, désignation donnée aux entreprises innovantes qui savent explorer et exploiter à la

¹⁶ L'organisation moderne et flexible a été auparavant appelée de Système de production Lean par (Womack, Jones, and Roos 1990).

fois. L'exploration (la recherche) leur permet de survivre à long terme, tandis que l'exploitation leur permet de pérenniser les innovations. Autrement dit, vivre de leurs innovations et aussi de réinvestir dans la recherche (pour plus de détails sur l'ambidextrie, voir [l'Annexe n°6](#)). Elle possède également des capacités dites dynamiques, qui sont la combinaison d'activité de conception, de production, de vente de produits et de services combinés à un management adapté (pour plus de détails sur les capacités dynamiques, voir [l'Annexe n°7](#)).

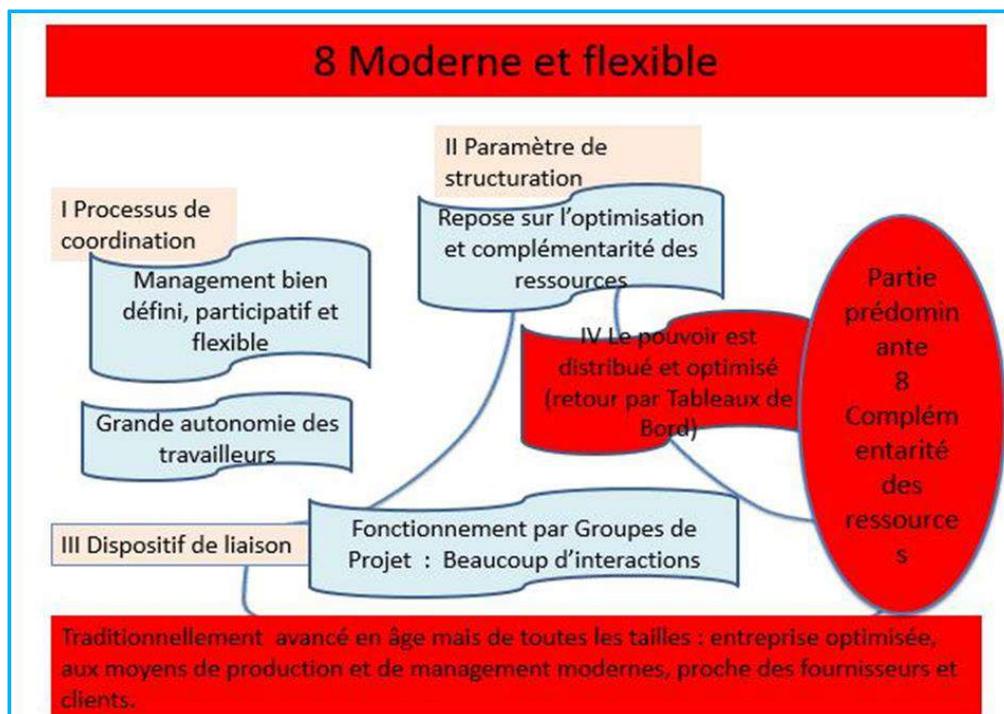


Figure 15 : Configuration organisationnelle : 8 Moderne et flexible

A présent, on peut schématiser la typologie de Mintzberg. Un code couleur est utilisé pour distinguer les 8 types d'entreprise avec les parties prédominantes correspondantes comme montré dans la Figure 16.

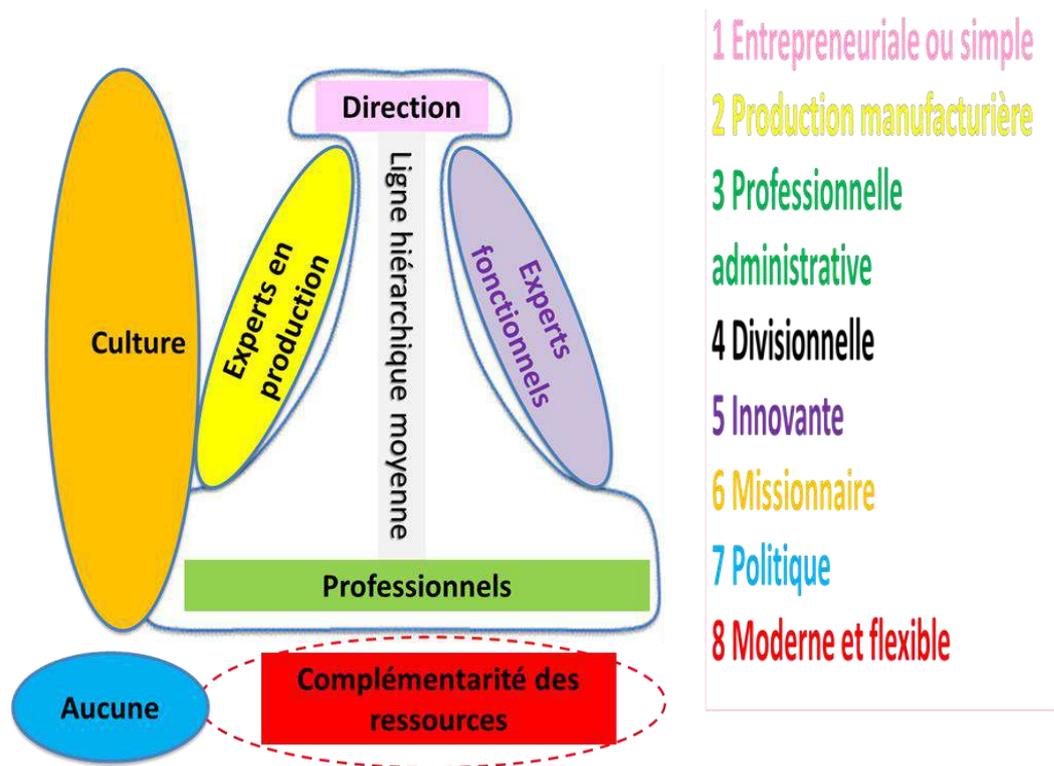


Figure 16 : Les 8 configurations organisationnelles, adapté de (Mintzberg 1980)

2.4. Les entreprises à fort degré de maturité mécatronique s'apparentent-elles à ces modèles d'entreprise auparavant identifiés ?

Au vu de ces éléments, le méta-modèle de Mintzberg a été opérationnalisé et instrumenté dans le but de profiler les entreprises pour voir de quel modèle organisationnel se rapproche le plus une entreprise donnée parmi les 33 de l'échantillon resserré.

Pour introduire le modèle de 9 compétences organisationnelles (Milgrom and Roberts 1995) à l'intérieur du méta-modèle de (Mintzberg 1980), ces 9 grappes de compétences ont été décomposées en actions et ventilées sur les 14 critères d'attributs et 6 éléments de contingence expliqués ci-après.

En effet, Mintzberg contribue à l'opérationnalisation du concept de fit stratégique faiblement opérationnalisé en son temps par un modèle textuel. A travers une revue de littérature, il identifie une vingtaine de facteurs globaux qu'il relie ensuite à 5 types d'entreprise de base. Il l'appelle « cadre d'analyse » (voir Tableau 66).

Il préconise de toujours évaluer une organisation en tant qu'ensemble de facteurs organisationnels internes désignés ci-après attributs de Mintzberg AM (voir Tableau 33) et externes qu'il appelle éléments de contingence (EC). Ces derniers sont les moyens que l'organisation a développé pour gérer la complexité ou la dynamique de l'environnement et les systèmes techniques qu'elle a utilisé, d'une part, pour rendre le travail routinier ou standardisé afin d'avoir une production fluide (Mintzberg parle alors du degré de l'automatisation de la production) et, d'autre part, pour gérer la complexité technologique de leurs produits (Mintzberg parle de la complexité du système technique). D'une façon générale, la réponse à la complexité environnementale se gère par la planification et la réponse à la dynamique environnementale par les innovations.

ATTRIBUTS DE MINTZBERG	ATTRIBUTS DE MINTZBERG
AM1 Autonomie des travailleurs	AM8 Orientation marchés
AM2 Standardisation des flux de travail	AM9 Contrôle de performance
AM3 Implication des spécialistes, analystes	AM10 Flux transversaux
AM4 Poids de la formation initiale/l'ensemble	AM11 Poids de la culture/sens de mission
AM5 Spécialisation en unités disciplinaires	AM12 Formation
AM6 Orientation systémique	AM13 Haute norme en compétences sociales
AM7 Orientation opérationnelle volumique	AM14 Présence de mécanismes clairs

Tableau 33 : Les 14 attributs organisationnels de Mintzberg AM relatifs aux choix organisationnels

ELEMENTS DE CONTINGENCE DE MINTZBERG	SINGULARITES DES ENTREPRISES MECATRONIQUES
EC1 Age	EC1 Age
EC2 Taille	EC2 Taille
EC3 Mélange de technologies	4 métiers mécatroniques
EC4 Automatisation du système technique	Adaptation forte à l'environnement 2
EC5 Réponse à la complexité environnementale	Savoir-faire complexe 4
EC6 Réponse à la dynamique environnementale	Innovations par Open contribution

Tableau 34 : Les 6 éléments de contingence de Mintzberg EC développés par l'organisation en tant que « réponse face à la complexité et dynamique de l'environnement » (à gauche) et notre adaptation (à droite)

Nous traduisons ces facteurs ou éléments de contingence (EC) comme présenté dans le Tableau 34. A savoir, l'âge et la taille des entreprises sont repris, la complexité du système technique est appréhendée en tant que mélange de plusieurs technologies comme cela est caractéristique pour l'entreprise qui a des compétences avérées en mécatronique. La traduction et l'adaptation voire simplification du méta-modèle de Mintzberg sont par ailleurs consultables dans [l'Annexe n° 2](#).

Dans la partie ci-après, la méthode pour opérationnaliser et instrumenter le méta-modèle de Mintzberg est explicitée.

2.4.1. La méthode utilisée pour opérationnaliser et instrumenter le méta-modèle de Mintzberg

Dans la partie précédente, nous avons présenté les concepts du fit stratégique et de la complexité organisationnelle utilisés comme base théorique du présent travail. Nous avons également simplifié la représentation de différentes activités et flux de travail de

l'organisation en les renommant en attributs organisationnels de Mintzberg AM ou encore éléments de contingence EC. Dans cette partie, la façon dont ils ont été opérationnalisés, est relaté.

L'évaluation des 33 entreprises de l'échantillon resserré s'est faite sur ces 20 critères ou variables que représente la somme des 14 attributs de Mintzberg et des 6 éléments de contingence ou encore les 20 compétences organisationnelles.

2.2.1.1. La méthode structurée ou « a priori »

La méthode structurée ou « a priori ¹⁷ » (Thiéart and Coll. 2007) permet d'agréger des objets en une classe d'objets supposés disposer d'attributs similaires ou distincts (Rosch 1978). Ainsi, dans le cas présent plusieurs facteurs rentrent dans une catégorie d'indicateurs qui, à leur tour, sont agrégés en variables qui représentent finalement un construit comme défini dans le Tableau 5. A l'inverse, cela consiste à décomposer une certaine catégorie en sous-catégories allant jusqu'à l'action qui n'est plus décomposable (Ford and Hergarty 1984). Cela permet de traduire les concepts en représentations concrètes des activités qui peuvent former une catégorie désignée d'attribut ou de contingence par Mintzberg.

L'avantage de cette méthode est donc de générer des représentations qui émanent d'un même ensemble de concepts ou catégories initiales. Cela permet de les comparer entre elles et de les agréger. Cette représentation s'applique également à la décomposition d'un objectif global en objectifs élémentaires.

Dans la partie suivante, nous expliquons de façon plus structurée ces entrées et sorties, présentons notre approche quantitative face à la qualitative de Mintzberg pour les 8 modèles théoriques montrant la progression de complexité de 1 vers 5.

¹⁷ L'objectif de cette méthode est de générer directement la représentation d'une personne concernant un problème qui intéresse le chercheur à partir d'un cadre qu'il a lui préalablement défini.

2.2.1.2. Opérationnalisation, codage et algorithme utilisés

Pour générer des représentations qui émanent d'un même ensemble de concepts ou catégories initiales, les comparer entre elles et les agréger, nous pouvons, par exemple, procéder comme décrit ci-après.

Si nous voulons obtenir une note globale pour l'attribut sur *l'Implication des spécialistes et analystes dans l'entreprise AM3*, nous pouvons construire une variable et l'appeler : *Nombre de spécialistes par rapport à l'ensemble*. Cette variable peut être décomposée en indicateurs : *Haute spécialisation*. Cet indicateur à son tour est décomposé en facteurs, qui eux, ne sont plus décomposables. Ici c'est : *Spécialistes Bac+5, Ingénieurs, Docteurs*.

Conjointement, on utilise une échelle de notation de 0 à 5 pour noter l'intensité de chaque facteur sur l'action observée pour une entreprise donnée (0 = Inexistant, 1 = Existant, 2 = Faible, 3 = Méthode, 4 = Systématique, 5 = Exemplarité), empruntée aux techniques de construction des questionnaires en marketing (Giannelloni and Verette 2012).

En attribuant une note à chacun des trois facteurs *Spécialistes Bac+5, Ingénieurs, Docteurs*, ces notes sont sommées et la note moyenne représente ensuite la valeur de l'indicateur *Haute spécialisation*. Enfin, la somme des indicateurs (quand il y en a plusieurs) représente la moyenne de la variable *Nombre de spécialistes par rapport à l'ensemble*. Cette variable représente ainsi la valeur de l'attribut, dans cet exemple.

Cet exemple donné ici pour l'attribut AM3 est visible dans la partie Opérationnalisation du méta-modèle de Mintzberg qui se trouve dans [l'Annexe n° 9](#) avec les autres attributs de Mintzberg (AM) et éléments de contingence (EC).

Cela est consistant avec les concepts de la performance et de la valeur données respectivement dans les Tableau 29, Tableau 30. A savoir, est performant celui qui atteint ses objectifs et la valeur s'apprécie non pas uniquement à partir des variables comptables mais également et surtout à partir de l'exploitation des effets combinés des activités primaires de production et de vente avec les activités dites de soutien comme montré dans la Figure 14.

En synthèse, les attributs de Mintzberg (AM) sont décomposés en variables VARL (définies par nous), les éléments de contingence (EC) en VARM, décomposées à leur tour en indicateurs IND (définis par nous) et ces derniers en facteurs FACT. Les facteurs ne sont pas décomposables en unités plus petites et sont considérés comme variables indépendantes. Ces dernières correspondent à des actions concrètes, telles qu'observées sur les sites des entreprises dont la liste est consultable dans le Tableau 64 de [l'Annexe n° 1](#). Les actions ou facteurs sont cependant adaptés par rapport aux références bibliographiques relatives aux innovations de produits, managériales, de processus et organisationnelles comme visible dans [l'Annexe n° 8](#).

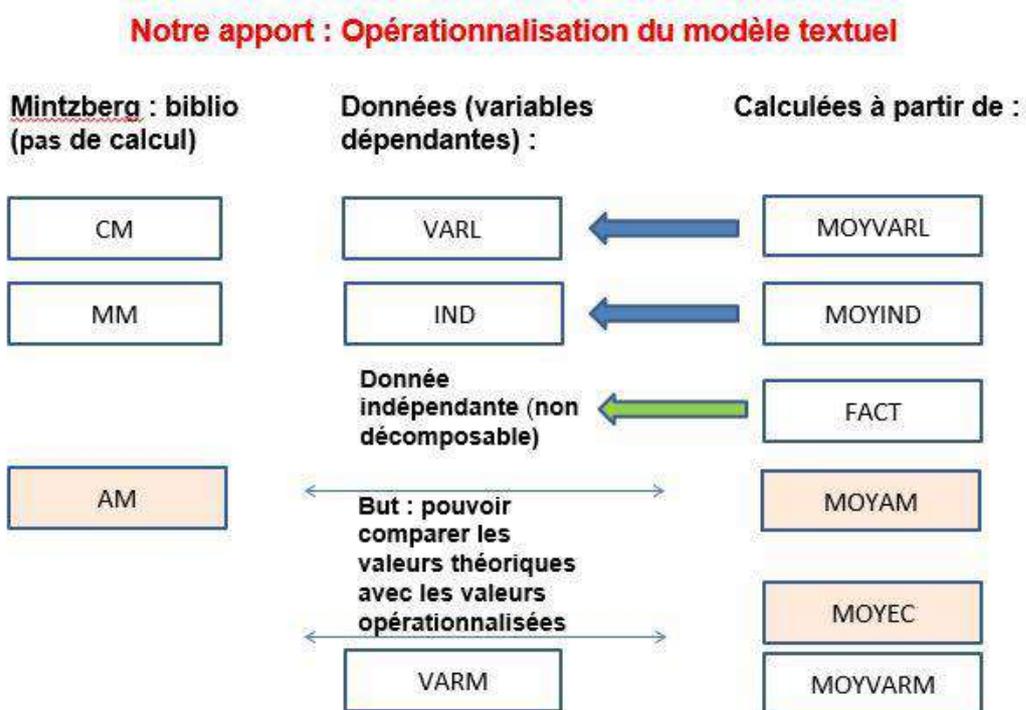


Figure 17 : Codage et opérationnalisation du modèle textuel de Mintzberg

Une fois la notation effectuée pour tous les modèles théoriques qui devaient se rapprocher au plus près de la note initialement pensée par l'auteur, nous avons renseigné les lignes de facteurs de notre fichier et obtenu 20 notes par modèle théorique. Ces 20 notes représentent les 20 compétences organisationnelles (la somme des 14 AM et 6 EC) sur lesquelles les entreprises sont notées. La contrainte

était également d'obtenir une progression allant de 0 à 5, à savoir obtenir une note faible pour le modèle 1 et une note optimale pour le modèle 8. Un test a été effectué par la somme de toutes les notes pour nous assurer de cette progression avant l'exploitation du méta-modèle. Il est consultable dans le Tableau 35.

TYPE d'entreprise	Notation Mintzberg	AM théorique	Moyenne pour AM TH	Notation Mintzberg	EC théorique	Moyenne pour EC TH
M1	Peu ou Faible	1	1,2	Peu ou Faible	1	1,5
M2	Peu ou Faible	2	2	Peu ou Faible	2	2
M3	Peu ou Faible	3	3	Peu ou Faible	2	2,3
M4	Pau ou Faible	3	2,7	Pau ou Faible	2	2,2
M5	Peu ou Faible	3	3,4	Peu ou Faible	3	3,3
M6	Peu ou Faible	2	2,9	Peu ou Faible	2	2,2
M7	Peu ou Faible	2	1,9	Peu ou Faible	2	2
M8	Grande	5	4,6	Grande	5	4,5

Tableau 35 : Evaluation qualitative et quantitative pour les attributs de Mintzberg et éléments de contingence des 8 modèles théoriques montrant la progression de complexité de 1 vers 5

Nous avons ensuite procédé de la même façon pour les entreprises mais nous les avons notées sans tenir compte de limitations des modèles théoriques. Ensuite, nous avons calculé l'écart entre les modèles théoriques ainsi calibrés et les entreprises notées.

Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme suivant pour calculer l'écart entre la valeur théorique et l'évaluation de l'entreprise réelle :

Équation 1

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{20} (N_i^{Th} - N_i^{Réel})^2}{\sum_{i=1}^{20} (N_i^{Th})^2}$$

Où :

i = numéro attribué aux 14 attributs AM et aux 6 éléments de contingence EC

N^{Th} = note du modèle théorique

$N^{R\acute{e}el}$ = note de l'entreprise réelle

N.B. : Lorsque l'observation directe de l'ensemble des actions n'a pas été possible pour les 33 entreprises notées à partir de leurs sites, on a procédé par déduction. C'est-à-dire, lorsque l'entreprise affichait une activité complexe comme le développement durable ou l'ingénierie de systèmes ou encore le développement collaboratif sans pour autant la détailler, nous avons pu par déduction y attribuer des actions que nous savons nécessaires à ces processus (compte tenu des recherches empiriques précédentes) et les assortir de notes allant de 1 à 5.

2.2.1.3. La représentation de 8 modèles d'entreprise théoriques par rapport aux 20 compétences organisationnelles

Une fois les 20 compétences organisationnelles définies pour les entreprises théoriques, nous les représentons sous forme de radars visibles dans [l'Annexe n° 9](#). Nous représentons ici les 8 radars superposés des 8 modèles par rapport aux 20 compétences organisationnelles, voir Figure 18, et les résultats de l'évaluation qui a été faite pour les 33 entreprises du panel resserré dans la Figure 19.

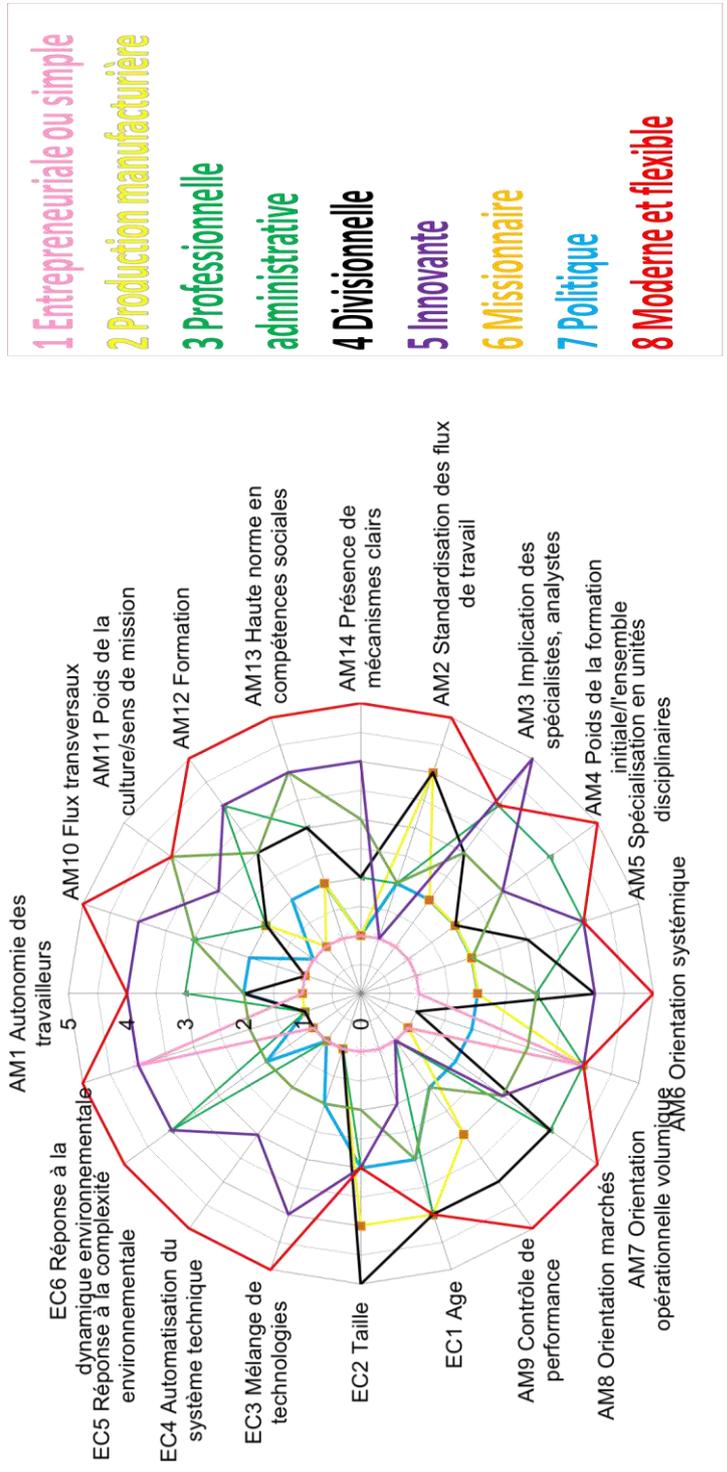


Figure 18 : Radars des 8 modèles d'entreprise superposés par rapport aux 14 attributs de Mintzberg et 6 éléments de contingence

2.4.2. Application aux 33 entreprises du panel

Après avoir effectué l'évaluation de 33 entreprises du panel resserré, les écarts mesurés entre les 8 valeurs théoriques et les évaluations des entreprises réelles nous ont indiqué que les entreprises évaluées s'apparentaient le plus à l'entreprise moderne et flexible. Ces résultats sont visibles dans la Figure 19.

4 Listes d'entreprises utilisées : Adhérentes à Artéma, Thésame, Lauréates du Label d'excellence Mont Blanc, Entreprises hors liste

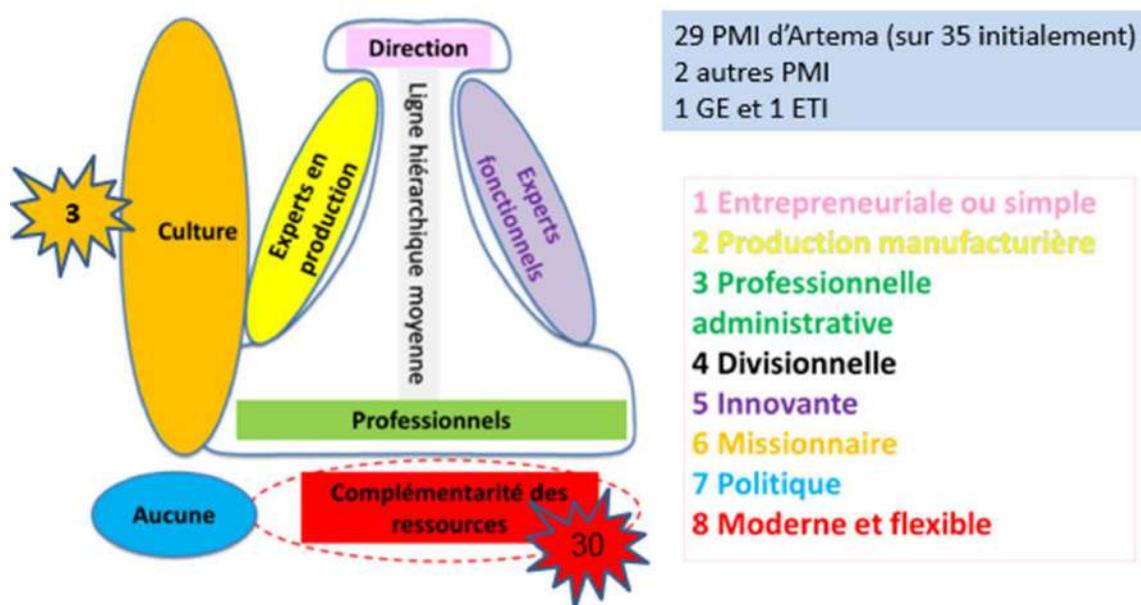


Figure 19 : La notation effectuée sur 33 entreprises montre qu'elles s'apparentent le plus à l'entreprise moderne et flexible

Les écarts mesurés pour 33 entreprises sont les moins importants entre les valeurs obtenues par la notation et le type théorique 8, soit l'entreprise moderne et flexible ou encore agile. Le classement d'entreprises est visible dans les tableaux allant de Tableau 128 à Tableau 131 de [l'Annexe n° 11](#).

Ces résultats sont parlants et montrent, que même les entreprises pas du tout mécatroniques peuvent adopter la forme moderne et flexible. C'est pour cette raison

que ce modèle ne peut pas décrire la totalité de la spécificité qui caractérise les entreprises qui ont développé une expertise en mécatronique.

Il a donc fallu dégager des processus qui méritent une plus grande attention dans la suite de l'étude des spécificités de la mécatronique : conception collaborative et veille technologique, amélioration continue, qualification des fournisseurs, production et logistique modernes, appui sur des activités de soutien, embauche d'experts, management participatif et responsable et formations continues. Ils sont présentés dans la Figure 20 et correspondent aux variables du méta-modèle sur lesquelles les entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique sont les mieux notées. En même temps, cela nous a permis de nous recentrer sur les contenus sous-jacents et synthétiquement décrits dans la Figure 21.

Enfin, ces variables descriptives nous ont également servi de base pour la préparation des entretiens avec les cinq entreprises pilotes consultées dont la restitution est faite dans le Chapitre 4.

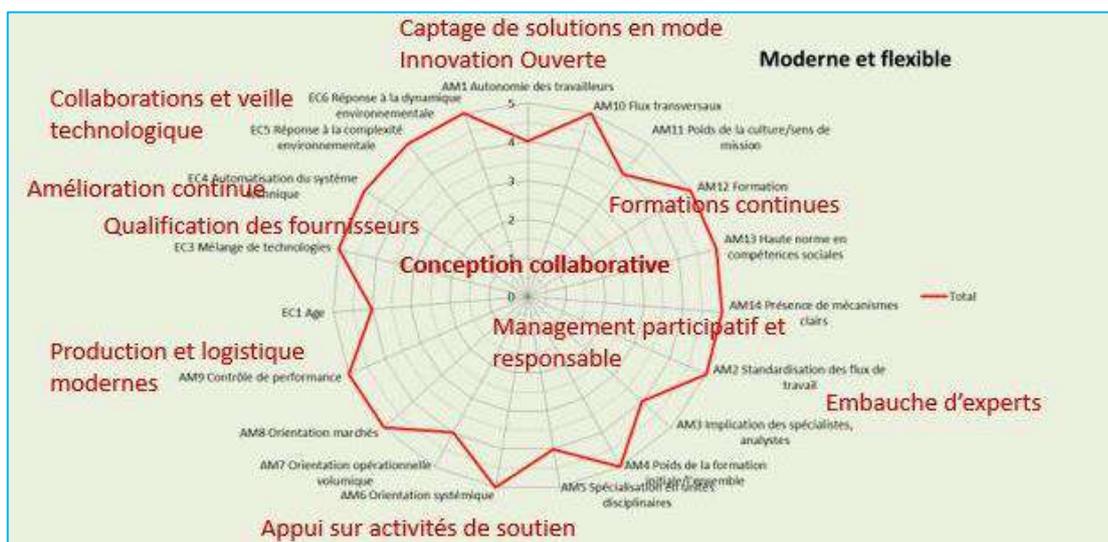


Figure 20 : La représentation synthétique des variables sur lesquelles les entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique sont le mieux notées, texte en rouge

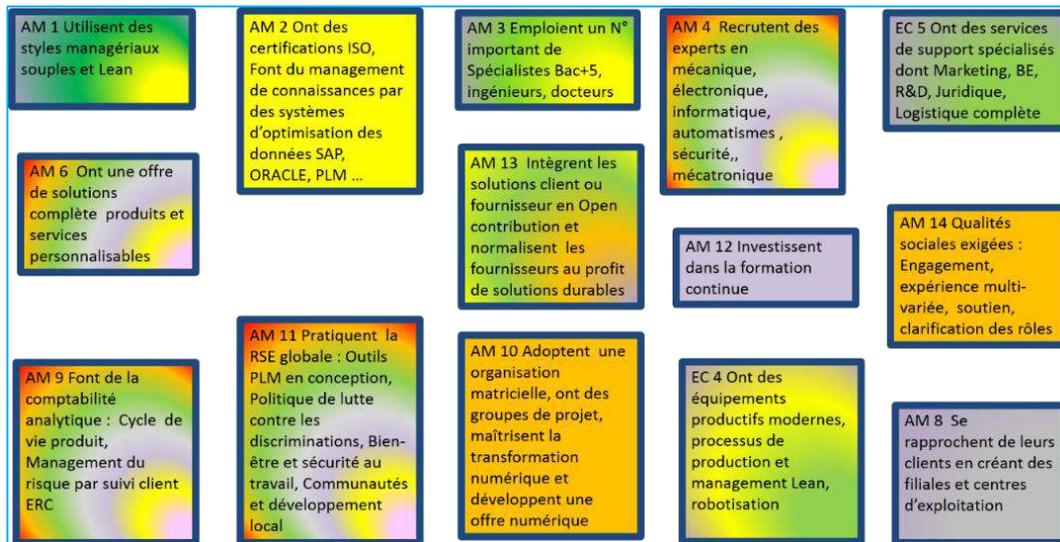


Figure 21 : Les contenus liés aux variables méritant d'être mieux étudiés pour comprendre la mécatronique et les entreprises qui font de la mécatronique

2.5. Conclusion

Cette deuxième analyse apporte une caractérisation de l'entreprise ayant une importante maturité mécatronique relativement à son système productif, managérial et stratégique. Une mesure a été instrumentée de façon à déterminer à quel modèle théorique, issu du méta-modèle de Mintzberg, une entreprise donnée s'apparente le plus. Après avoir effectué la notation de 33 entreprises du panel resserré pour 20 compétences organisationnelles notées sur une échelle de 1 à 5, nous avons trouvé que les entreprises notées s'apparentent le plus à l'entreprise « moderne et flexible », et dans une moindre mesure « Missionnaire », comme visible sur la Figure 22.

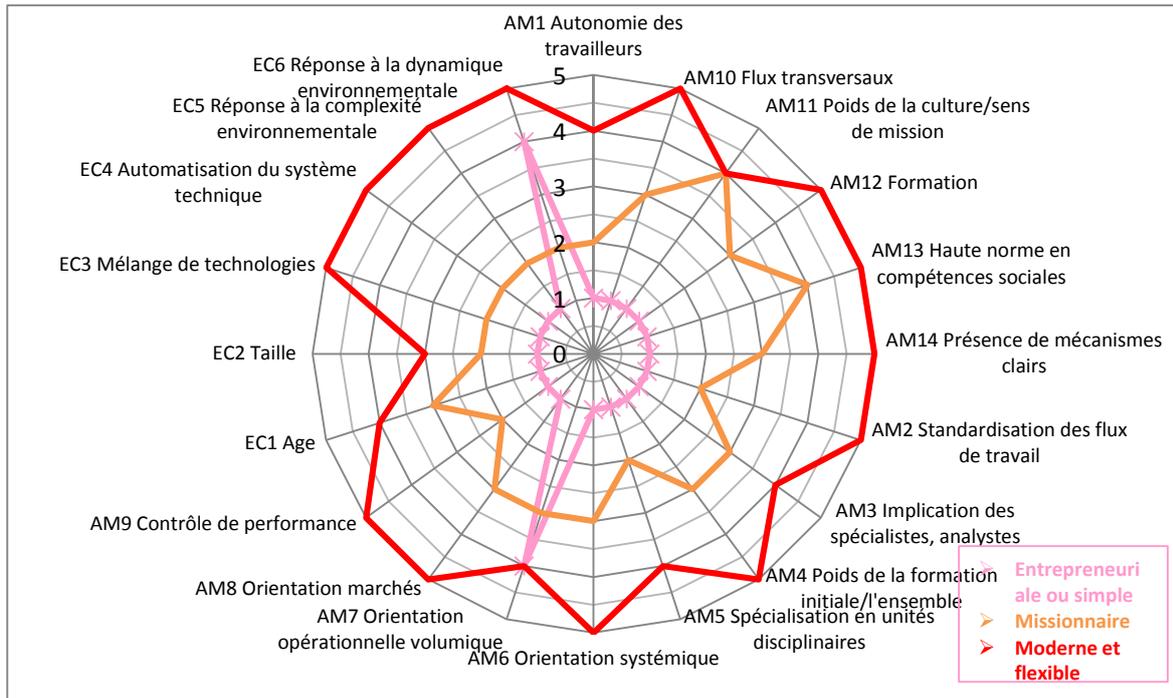


Figure 22 : 3 entreprises notées sur 33 ont la forme qui ressemble le plus à la « Missionnaire » et 30 la forme plutôt « Moderne et flexible »

En théorie, une entreprise traditionnelle du secteur de la mécanique ressemblerait plutôt au type d'entreprise simple qui aurait un long chemin à parcourir avant de devenir mécatronique, comme montré sur la Figure 23. Dans la réalité, les frontières entre les modèles ne sont pas aussi étanches, néanmoins, une structure simple par définition ne peut se complexifier que progressivement.

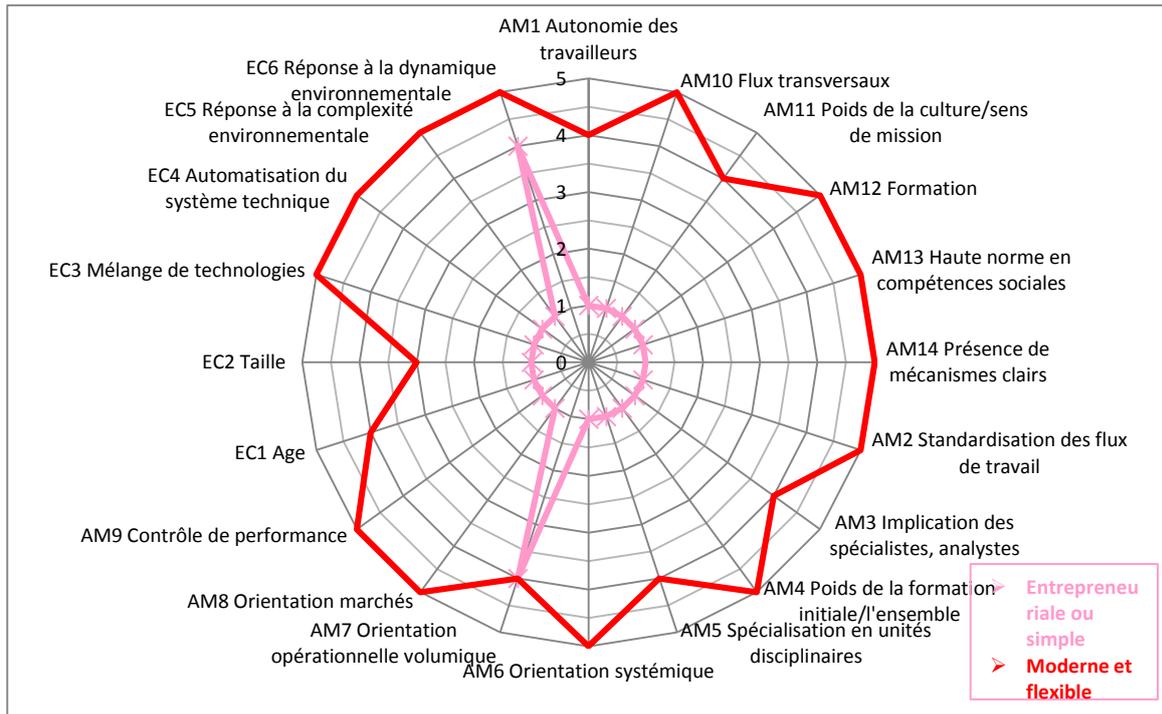


Figure 23 : A priori, la différence entre la forme la plus simple ou entrepreneuriale et la plus sophistiquée, moderne et flexible, est grande

Les trois formes organisationnelles intermédiaires qui tendent progressivement vers la forme moderne et flexible sont les formes de « production manufacturière », « la divisionnelle » et « l’innovante », visibles sur la Figure 24.

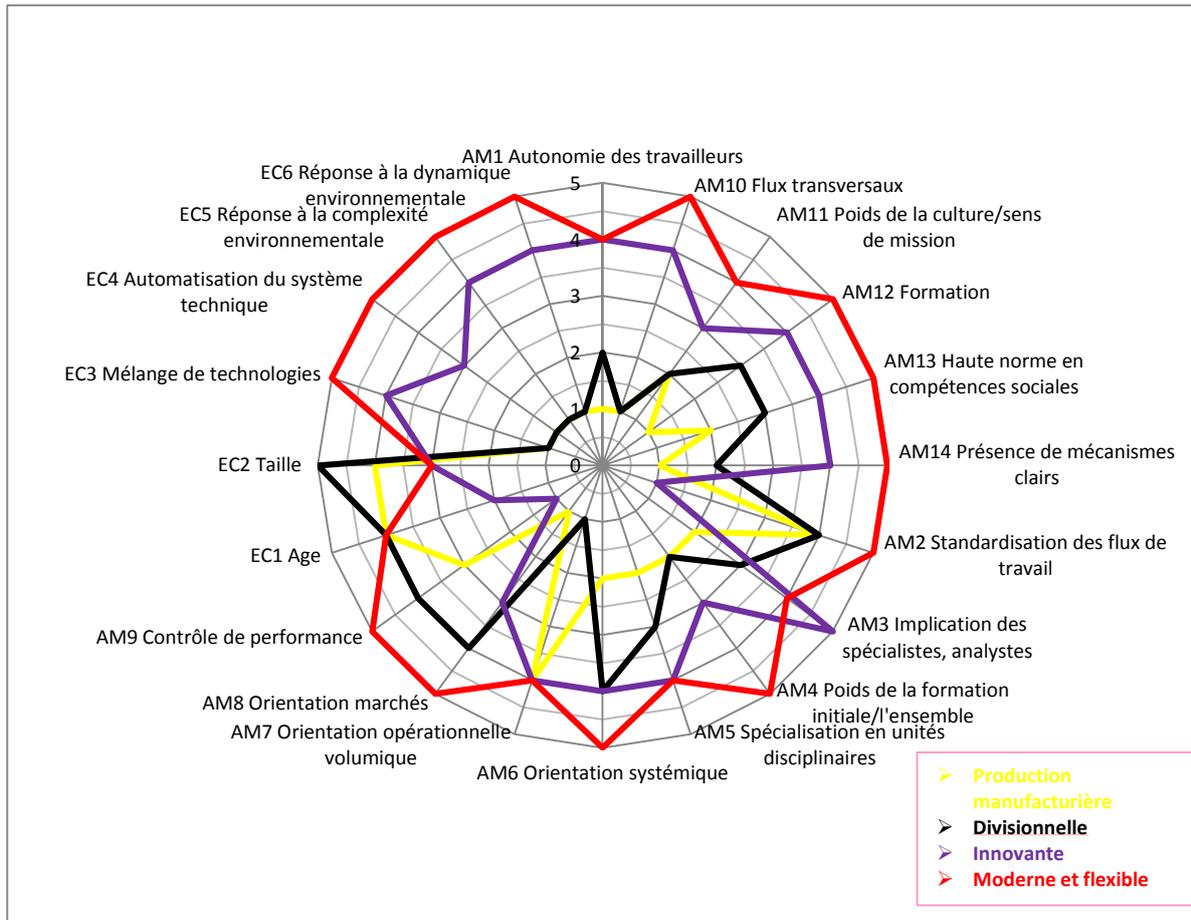


Figure 24 : Une entreprise « simple » va probablement passer par ces différentes formes organisationnelles avant de devenir moderne et flexible

L'entreprise manufacturière présente une évolution de l'entreprise simple par la mise en place de l'industrialisation de produits, l'entreprise divisionnelle reflète la création de succursales et se rapproche de différents marchés et l'entreprise innovante opte pour la création d'un bureau d'études multidisciplinaire qui peut évoluer vers un service R&D fortement couplé aux services de soutien comme le marketing.

L'innovation pour ces entreprises doit être comprise dans un sens large comme, par exemple, celui donné par (Crossan and Apaydin 2010) : « *Une innovation*¹⁸ est

¹⁸ *Innovation is: production or adoption, assimilation, and exploitation of a value-added novelty in economic and social spheres; renewal and enlargement of products, services, and markets; development of new methods of production; and establishment of new management systems. It is both a process and an outcome.* (Crossan and Apaydin 2010)

conjointement l'adoption, l'assimilation et l'exploitation d'une nouveauté à valeur ajoutée dans les sphères économiques et sociales ; c'est aussi un renouvellement de produits et l'élargissement de gamme de produits et de marchés ; c'est aussi le développement de nouvelles méthodes de production et l'établissement de nouveaux systèmes managériaux. L'innovation c'est aussi bien un processus qu'un résultat. »

Enfin, de très nombreuses organisations de tous secteurs confondus s'orientent vers le type d'entreprise moderne et flexible, et s'affichent innovantes, y compris celles ayant un faible niveau de maturité mécatronique, comme montré par les résultats obtenus, visibles dans les tableaux allant de Tableau 128 à Tableau 131. Le gap entre ces entreprises ayant aujourd'hui une importante maturité en matière mécatronique et les candidates à la mécatronique, n'a donc pas pu être mis en évidence de façon précise par la mesure présentée dans ce chapitre.

Il est donc important d'approfondir l'analyse au niveau du produit et de quantifier ce degré de mécatronicité, puisque la plupart des entreprises de notre échantillon ont une offre de produits mais également de services. Ensuite, il convient de faire le lien entre le produit et les processus de servicisation qui deviennent possibles. C'est pour toutes ces raisons que le lien entre le produit et les modèles d'affaires qu'il conditionne ou permet de mettre en place est mis en exergue dans les deux chapitres suivants.

2.6. Lien entre organisation et produit

A ce stade de la restitution, nous faisons le choix de resserrer le périmètre de notre étude sur les entreprises à forte maturité mécatronique. Nous considérons donc que ces entreprises font réellement des produits mécatroniques en premier lieu et qu'elles doivent être étudiées à partir du produit. Cela représente également la phase dite du prétest où le point de stabilisation de la problématique est atteint et doit apporter une solution concrète à la question de recherche globale : « Par quels moyens objectifs et reproductibles les petites et moyennes entreprises traditionnelles mécaniques du secteur de décolletage peuvent être aidées lorsqu'elles choisissent de s'engager dans la conception et production mécatroniques ? »

Par conséquent, il a été décidé d'imaginer des outils qui permettent de déterminer ce niveau de performance dans la pratique mécatronique.

Il s'agit de deux outils qui s'intègrent dans l'outil de pilotage stratégique et opérationnel appelé business motivation model (BMM) que l'on peut appréhender comme un « méta-modèle pour la génération de plans d'affaires » parce qu'il permet de répondre, d'une façon générique, aux questions suivantes : quelles stratégies, tactiques et actions doivent être menées et dans quelles unités de l'entreprise pour atteindre les objectifs visés ? Ce qui, d'une façon schématique est aussi représenté par des questions « quoi doit-être mesuré ou surveillé » et « comment et où doit-on agir » pour arriver au résultat visé comme montré sur la Figure 25. La définition générique du BMM¹⁹ est donnée par l'Object Management Group (Omg 2010) et se traduit comme suit : « *Le BMM fournit un schéma ou une structure pour le développement, la communication et la gestion de plans d'affaires d'une façon structurée (...). Il permet l'identification et la définition de facteurs qui motivent l'établissement de tels plans d'affaires et indique comment ils interagissent* ». Le BMM fait partie d'outils de modélisation d'entreprise comme le font par exemple TOGAF, Zachman's framework ou encore d'autres. Le BMM est un outil considéré comme étant flexible et bien adapté aux organisations qui se dirigent vers un système de production assorti de services (en anglais : production systems and services (PSS)). Alors, une réorientation d'architecture depuis l'entreprise traditionnelle vers une architecture à orientation services doit être planifiée (en anglais : service oriented architecture (SOA)) et le business motivation model (BMM) est un outil qui répond bien à cette contrainte (Berkem 2008).

Sur la Figure 25, le modèle de recherche référentiel mécatronique est visible. Il schématise les liens qui sont étudiés entre les outils pour la détermination du niveau de performance dans la pratique mécatronique. Le premier outil proposé est composé de métriques pour évaluer le degré de mécatronicité du produit. L'objectif est d'établir ensuite une corrélation entre ce degré de mécatronicité du produit et l'organisation

¹⁹ The Object Management Group defines it as follows: “*The BMM provides a scheme or structure for developing, communicating and managing business plans in an organized manner (...) and permits to identity factors that motivate the establishing of business plans, identifies and defines the elements of business plans and indicates how all these factors inter-relate*”

(non visible de l'extérieur a priori) qui a permis de concevoir et fabriquer un tel produit. Cette corrélation se fait à l'aide du deuxième outil qui permet d'effectuer un état des lieux au niveau des processus et de les comparer à un état d'évolution souhaitée. Elle est présentée dans le Chapitre 4.

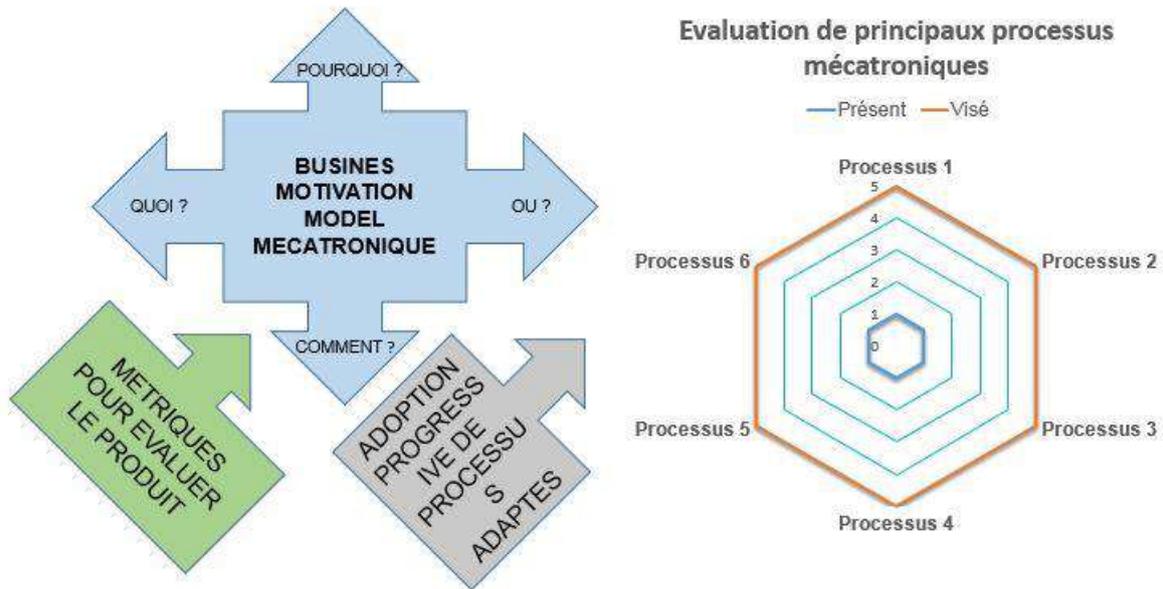


Figure 25 : Le modèle de recherche référentiel mécatronique : On étudie le lien entre le degré de mécatronicité du produit et la maturité mécatronique de l'organisation

Ainsi, dans le Chapitre 3 suivant, la restitution vise d'abord le produit mécatronique. Ce dernier, défini comme intégré physiquement et fonctionnellement, est étudié dans sa dimension fonctionnelle et stratégique. Des métriques pour quantifier le degré de mécatronicité et une méthode d'analyse fonctionnelle reproductible y sont proposées.

3. Chapitre 3 - Les entreprises à forte maturité mécatronique font des produits mécatroniques

3.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, les résultats issus de la caractérisation généraliste de l'entreprise identifiée, a priori, comme celle ayant une maturité mécatronique affirmée, ont été présentés. En effet, par le biais du méta-modèle générique, il est possible de faire le rapprochement entre les 33 organisations notées et l'organisation théorique dite moderne et flexible. Toutefois, la spécificité mécatronique ne peut être cernée par ce méta-modèle générique c'est pourquoi on développe deux outils de mesure qui permettent une évaluation plus fine. Ce chapitre présente le premier outil ou levier comme présenté sur la Figure 26.

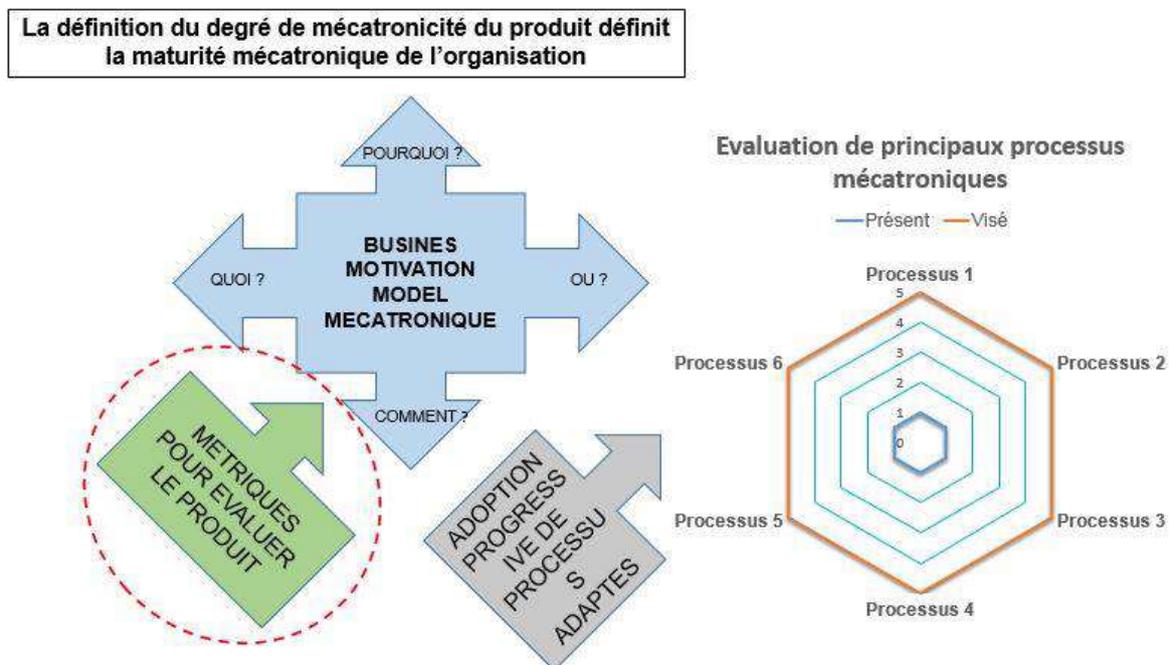


Figure 26 : La définition du premier outil, les métriques, pour définir la maturité mécatronique d'une entreprise

Etant donné que l'objectif global de ce travail de recherche est d'une part, de définir un référentiel pour évaluer le degré de maturité mécatronique des entreprises PME et PMI et d'autre part, d'identifier les processus qu'il est nécessaire de maîtriser pour la réalisation de tels produits, on part du principe que la maturité d'une entreprise engagée dans la production de produits mécatroniques est corollaire de la qualité du produit qu'elle fabrique. Ainsi, on définit des métriques qui permettent d'apprécier le degré de mécatronicité d'un produit sur différents aspects comme l'intégration fonctionnelle et l'intégration physique telles qu'elles sont définies qualitativement dans la norme NF E 01- 0 10 (AFNOR 2008).

Cette troisième partie du mémoire restitue donc les résultats de l'étude portée sur la quantification du degré de mécatronicité d'un produit. L'objectif est d'établir une corrélation entre le degré de mécatronicité du produit et celui de l'organisation moyennant une méthode de calcul pour évaluer la maturité d'un produit mécatronique tout en s'appuyant sur sa dimension fonctionnelle, peu étudiée jusqu'à présent.

A terme, il s'agit de fournir des outils méthodologiques pour les PME et ETI traditionnelles pour qu'elles puissent définir des stratégies qui leur facilitent l'accès au prometteur marché des produits mécatroniques.

Ce chapitre restitue tout d'abord les définitions normatives mécatroniques et celles retenues par rapport à la problématique au niveau du management par la valeur, survole l'expérimentation menée sur la base de décomposition hiérarchique proposée par (Warniez 2015) et l'analyse conceptuelle proposée par (Ulrich 1995) et donne surtout notre définition du module fonctionnel et la proposition de métriques d'intégration fonctionnelle, leur méthode d'application et l'expérimentation menée sur deux produits commercialisés. Enfin, le lien entre les fonctions du produit et la formulation de l'offre pour bâtir des modèles d'affaires est proposé à la fin du chapitre.

3.2. Deux spécificités des produits mécatroniques mises en exergue : leur fonctionnalité et leur caractère multi-physique

3.2.1. Le produit mécatronique, tel que qualitativement défini par la norme

Seules l'intégration fonctionnelle et physique sont explicitement définies dans la norme mécatronique NF E 01- 0 10 (AFNOR 2008), comme montré dans le Tableau 36.

L'intégration physique définit l'intégration des supports mécaniques et électroniques. D'une manière plus étendue, elle indique que les fonctions d'un produit mécatronique résultent de la combinaison de composants de technologies multi-domaines.

L'intégration fonctionnelle définit, quant à elle, l'apport de fonctions supplémentaires de détection, de communication, de traitement de l'information et de rétroaction aux fonctions mécaniques de base.

« Intégration physique : Interpénétration de supports mécanique et électronique (qui embarquent les fonctions automatique et informatique). »

« Intégration fonctionnelle : Apport de fonctions de détection, de communication, de traitement de l'information et de rétroaction aux fonctions de mécanique de base. »

Tableau 36 : La définition de l'intégration fonctionnelle et physique dans la norme mécatronique NF E 01- 0 10 (AFNOR 2008)

Les travaux de (Warniez 2015) proposent également la définition de l'intégration multi-domaine, proche de l'intégration physique, donnée dans Tableau 37.

« L'intégration fonctionnelle consiste à intégrer le plus possible de fonctions dans un produit, soit par combinaison de plusieurs fonctions dans un seul composant, soit en dématérialisant certaines fonctions par l'utilisation de technologies informatiques programmables (par exemple, les microcontrôleurs ou les micro-processeurs). »

« La conception des systèmes mécatroniques met également en jeu l'intégration de plusieurs disciplines dans une même solution technologique. Cela requiert l'intégration dans

un modèle unique de toutes les lois physiques, quel que soit le domaine. On parle alors d'intégration multi-domaine. »

Tableau 37 : Les définitions de l'intégration fonctionnelle et multi-domaine, proches, données par (Warniez 2015)

Ainsi l'analyse de normes NF 01 010 (AFNOR 2008) donnant la définition de la mécatronique au niveau du vocabulaire pour la première et XP E 01 013 (AFNOR 2009)²⁰, proposant d'appréhender la mécatronique du point de vue des processus pour la deuxième, nous incitent à proposer des métriques car elles retiennent en particulier deux axes pour positionner les produits mécatroniques.

Le premier axe concerne l'intégration physique qui définit l'intégration des supports mécaniques et électroniques. D'une manière plus large, elle indique que les fonctions d'un produit mécatronique résultent de la combinaison de composants de technologies multi-domaines, avis partagé par (Warniez 2015) : « *l'intégration fonctionnelle et multi-domaine ont souvent le même objectif final qui consiste à réduire la masse et à augmenter la compacité du produit* » comme cela est visible dans le Tableau 36.

²⁰ La norme XP E 01 013 (AFNOR 2009) a été annulée.



Figure 27 : Un exemple d'intégration multi-domaine dans l'alternateur-démarrateur intégré i-Stars de Valeo Source : <http://www.valeo.com/fr/systeme-stop-start/>

L'alternateur-démarrateur intégré i-Stars de Valeo (Figure 27), qui d'après (Warniez 2015) illustre bien « *la façon dont les parties mécaniques deviennent le support des composants électroniques et comment l'électronique embarquée est distribuée dans le support mécanique* ».

Le second axe concerne les technologies d'information et de la communication qui favorisent l'intégration massive de fonctions automatisées dans les produits d'industriels. Ainsi l'intégration fonctionnelle définit l'apport de fonctions supplémentaires de détection, de communication, de traitement de l'information et de rétroaction aux fonctions mécaniques de base, comme définit dans la norme NF 01010 (AFNOR 2008). Ceci est illustré par l'exemple industriel de l'évolution mécatronique du disjoncteur fabriqué par l'entreprise Schneider Electric, où la complexité se traduit par une intégration physique et fonctionnelle appelée dans la littérature «cross-functional integration» (Penas et al. 2009). Un exemple concret de cette intégration fonctionnelle transversale est visible sur la Figure 28. Il s'agit du capteur mécanique bilame du disjoncteur Intégral 32 qui mesure un courant excessif et déclenche mécaniquement un contact. Celui-ci a été remplacé, dans le nouveau disjoncteur « Tesys U » mécatronique, par un circuit logique programmable (ASIC) intégrant des

fonctions supplémentaires telles que la transmission des informations avec une précision améliorée dans la restitution de données ; la gamme de courant est élargie, il y a l'auto-vérification de la tension en lien avec un convertisseur de tension, le tout au sein d'un même composant (Warniez 2015).

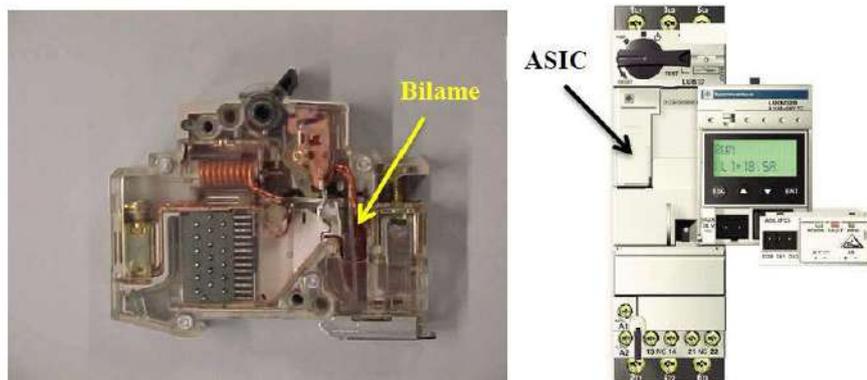


Figure 28 : Exemple de l'évolution mécatronique depuis le disjoncteur Intégral 32 (à gauche) vers le disjoncteur Tesys U (à droite) de Schneider Electric. Source : (Warniez 2015)

L'intégration physique et l'intégration fonctionnelle diffèrent donc : un produit intégré fonctionnellement est un produit à densité de fonctions élevée. Par contre, un produit intégré physiquement est un produit dont les composants ne sont pas toujours dissociables et pour cause : l'interpénétration des technologies est grande et cela conduit à de forts couplages.

Mais qu'en est-il de leur degré de mécatronicité ? En effet, ces normes permettent de qualifier le produit et les processus mécatroniques mais ne proposent pas d'indicateurs pour quantifier le degré de mécatronicité des produits ou des processus impliqués à leur réalisation. Toute comparaison objective entre les produits est donc impossible.

Pour qualifier un produit mécatronique, les normes nous amènent donc nécessairement à tenir compte en premier lieu des fonctions du produit. La méthode de calcul proposée dans ce chapitre s'appuie sur la définition fonctionnelle du produit ce qui revient à faire de l'analyse fonctionnelle. Cette dernière est à la portée des PME. et est également donnée par la norme NF EN 16271 (AFNOR 2013) qui remplace la norme homologuée NFX50-151 de 2007 : « Management par la valeur – Expression fonctionnelles du besoin et cahier de charges fonctionnel – Exigences pour

l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou obtention d'un produit ». Nous l'utilisons en tant que référence dans le présent travail.

Dans cette norme, les exigences pour l'expression et la validation du besoin du client à satisfaire dans le processus de conception d'un produit sont également données. Cette étape se révèle être importante puisqu'elle constitue le lien entre le produit et l'offre qui commence à être formulée à partir des fonctions que le futur produit est censé remplir. Nous y revenons plus en détail en fin de chapitre.

La quantification du niveau d'intégration physique ou fonctionnelle requiert ensuite d'identifier et recenser les composants et leurs domaines technologiques utilisés pour satisfaire les fonctions identifiées du produit. Cela revient donc à évaluer les flux fonctionnels pour chaque composant. Une fois ces flux établis, il est alors possible d'évaluer différents indicateurs quantifiant le niveau de mécatronicité du produit.

A ce titre, l'entreprise qui fait des produits mécatroniques se doit également de maîtriser les processus du management par la valeur, montrés dans la Figure 29 et décrits dans le Tableau 38.

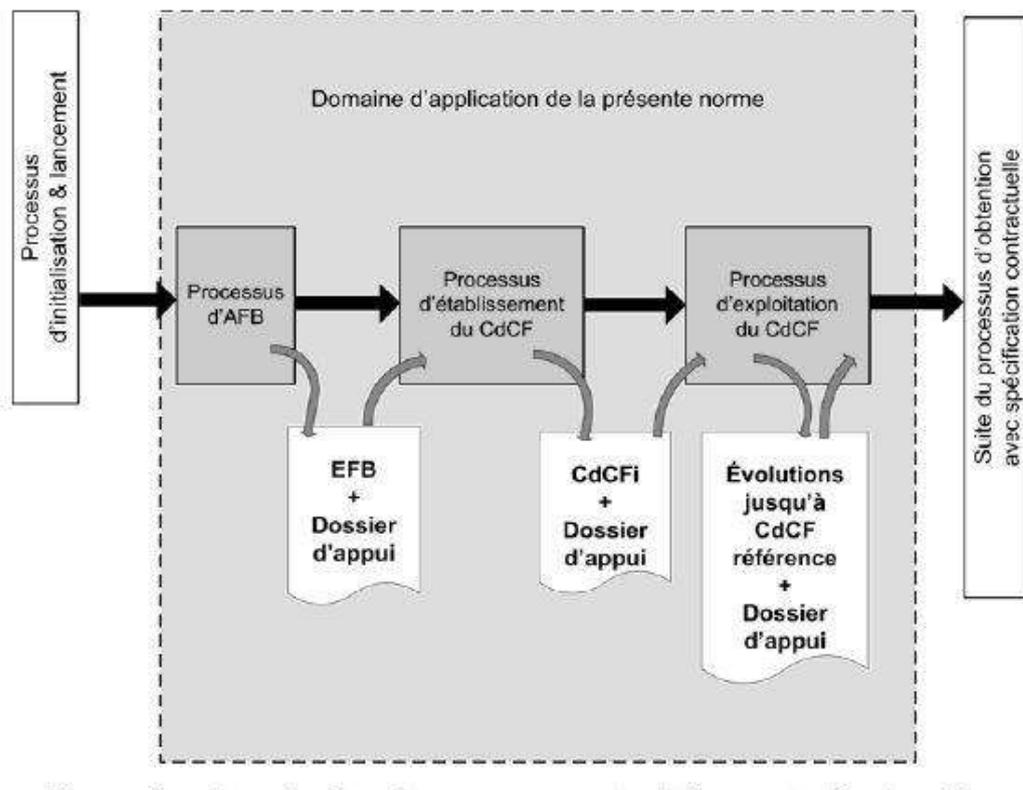


Figure 29 : Domaine d'application de la norme du Management par la valeur NF EN 16271 en allant de L'AFB (Analyse Fonctionnelle du Besoin) à L'EFC (Expression Fonctionnelle du Besoin) et au CdCHF (Cahier de Charges Fonctionnel) Source : (AFNOR 2013)

AFB L'Analyse Fonctionnelle du Besoin est un processus qui s'applique tant à un objet physique qu'à une organisation, un service, une prestation intellectuelle, un logiciel, un système d'information ou toute combinaison d'éléments précédents. Les services à rendre (fonctions de service) par un produit doivent être définis préalablement à sa réalisation, justifiant ainsi son acquisition ou, plus généralement, son obtention. L'AFB (...) définit les résultats attendus et non pas les moyens à mettre en œuvre.

EFC Expression Fonctionnelle du besoin matérialise les résultats obtenus par l'AFB. L'EFC organise l'information suivant une logique explicative rigoureuse et renseignée. Elle apporte une appréciation des éléments, permettant une prise de décision en toute connaissance de cause ; permet de lancer la conception et la réalisation du produit le plus approprié à rendre le service désiré, le plus apte à l'emploi prévu, aux performances les mieux adaptées ;

CdCHF Le Cahier de Charges Fonctionnel CdCF est un document par lequel le demandeur exprime ses besoins en termes de fonctions de service et de contraintes.

Tableau 38 : Définitions extraites de la norme NF EN 16271 du Management par la valeur (AFNOR 2013) et auxquelles on fait référence dans le périmètre de ce travail

Cette étude s'appuie donc sur l'analyse fonctionnelle, qui d'après la norme sur le management par la valeur NF EN 16271 (AFNOR 2013) est « une démarche qui décrit complètement les fonctions et leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées et évaluées ». Dans le Tableau 132 en [Annexe n° 12](#) se trouvent les définitions auxquelles on fait référence dans le périmètre de ce travail.

Les définitions extraites de la norme NF EN 16271 du Management par la valeur (AFNOR 2013) et auxquelles on fait référence dans le périmètre de ce travail sont consultables dans l'Annexe 12.

Dans la partie ci-après, une méthode d'évaluation des produits mécatroniques est proposée.

3.2.2. Les courants de recherche relatifs à la dimension fonctionnelle en mécatronique

Le spectre fonctionnel des produits mécatroniques est particulièrement large voire configurable et cela génère quelque difficulté pour l'appréhender. L'étude de l'aspect fonctionnel des produits est donc relativement peu étendue en mécatronique ou encore liée à la modularité. Les travaux académiques précédents proposent les critères d'évaluation des architectures fonctionnelles dans le contexte de modularité fonctionnelle (Hehenberger and Zeman 2005), de modularité pour le cycle de vie et coût (Zhang and Gershenson 2003), de modularité de conception pour le cycle de vie, (Newcomb, Bras, and Rosen 1998), des métriques de modularité des blocks dans une architecture (Turki 2008) ou encore proposent des outils pour la résolution de problèmes dans la recherche de solutions pour fournir une fonction donnée (Hamida et al. 2015), (Bonjour et al. 2013).

Dans ce travail de thèse, on retient la définition de la fonction dans sa dimension fonctionnelle ou fonction de service, comme visible dans le Tableau 132.

La proposition de développement de métriques dans ce travail est alors relative à l'analyse fonctionnelle du produit où une liste de fonctions de service doit être

clairement établie et aux flux fonctionnels que l'on doit pouvoir identifier. En même temps, cela permet de faire un lien entre les fonctions de service et l'offre de produit. En effet, les fonctions de service peuvent être vues comme la capacité du produit à satisfaire une demande. Le lien entre les fonctions de service du produit et la formulation de l'offre peut ainsi être établi. Il est donné en fin de ce chapitre et renvoie aussi bien à la norme de management par la valeur comme argumenté auparavant qu'à la faculté de savoir bâtir des modèles d'affaires, le tout discuté en fin de ce chapitre.

Cette thèse a également pour but de contribuer à la standardisation progressive du métier mécatronique. Elle est donc dans la lignée des travaux visant l'identification d'architectures de produits en lien avec l'organisation des processus de conception et de stratégies de produits fonctionnels et/ou modulaires comme identifié auparavant par (Ulrich 1995) et les travaux de (Pimmler and Eppinger 1994). Ces derniers préconisent une méthode pour l'analyse du produit par décomposition afin de mieux gérer sa complexité, comme proposé auparavant par le « père » du concept de la complexité (Simon 1962). Cette technique est utile pour développer et comprendre les besoins en ingénierie systèmes liés à la complexité des interactions pendant le processus de conception. La méthode repose sur trois phases pour définir l'architecture du produit et organiser les équipes de conception : 1) la décomposition du système en éléments, 2) la définition des interactions entre les éléments et 3) le regroupement d'éléments au niveau du produit et des équipes de développement.

(Hehenberger and Zeman 2005), (Hehenberger 2012) quant à eux, contribuent à l'opérationnalisation du concept de complexité pour les systèmes mécatroniques par le biais de la décomposition architecturale qui permet de décomposer un système mécatronique complet en différents niveaux d'abstraction donc en sous-systèmes, les sous-systèmes en modules et ces derniers encore en composants dont la spécificité est qu'ils sont mono-domaines (Kellner and Hehenberger 2014).

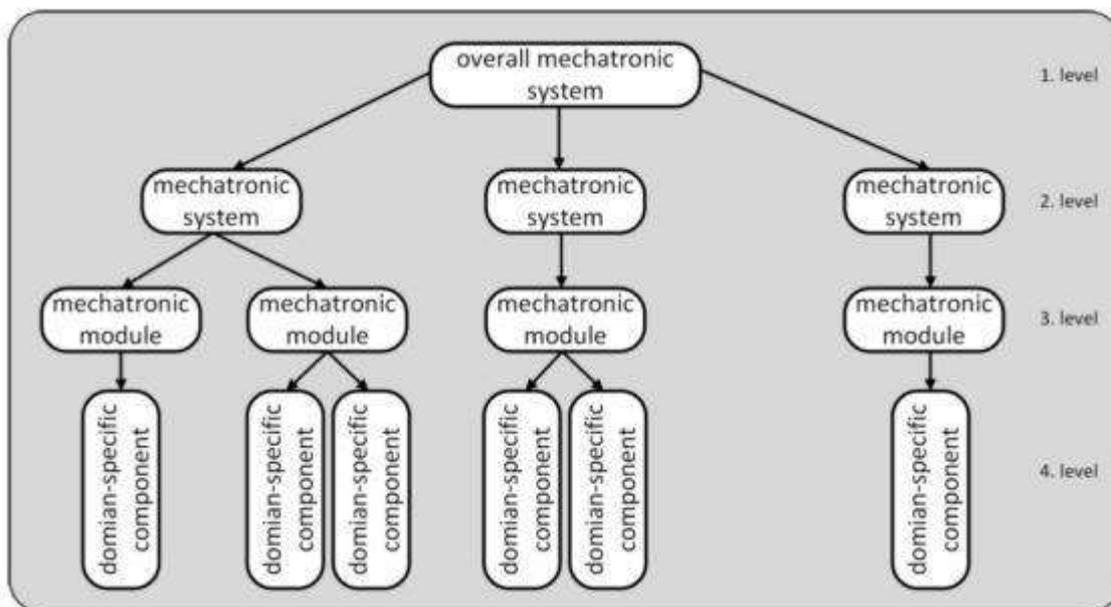


Figure 30 : Structure hiérarchique d'un système mécatronique (Kellner and Hehenberger 2014)

Dans la partie ci-après, on présente synthétiquement les différentes approches de l'étude de la mécatronique ainsi que l'approche de la décomposition architecturale de la complexité top down (voir Figure 30) de produits mécatroniques préconisée par (Hehenberger 2012) et notre expérimentation menée sur un produit fabriqué sur la base de métriques, introduites mais développées à partir des travaux de (Warniez 2015).

3.2.3. Les métriques pour quantifier la mécatronique

Des travaux précédents proposent des métriques par l'utilisation d'outils de modélisation multi-physiques dans la conception mécatronique en ingénierie de systèmes où la maîtrise de l'utilisation de langages de modélisation évolués comme le SysML est cependant indispensable (Turki 2008) et (Bonjour 2008), (Bonjour et al. 2009), (Bonjour and Micaëlli 2010).

3.2.3.1. Métriques d'intégration par différents niveaux d'abstraction et multi-domaine

Le développement de métriques pour la conception mécatronique et leur description à l'aide du langage System Modeling Language (SysML) est également proposée par (Warniez, Penas, and Soriano 2011) qui, à leur tour, reprennent cette analyse top-down et, dans sa thèse, (Warniez 2015) développe des métriques d'intégration par niveaux d'abstraction d'une part et les métriques d'intégration multi-domaines pour la conception mécatronique d'autre part.

La décomposition d'un système mécatronique se fait alors comme montré dans les Figure 30 et Figure 31 .

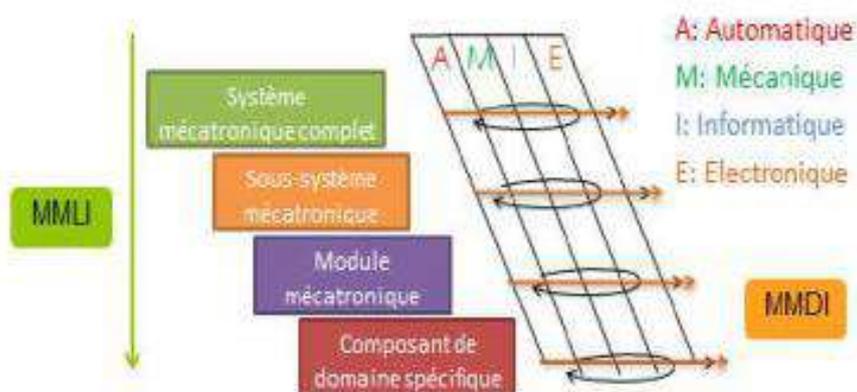
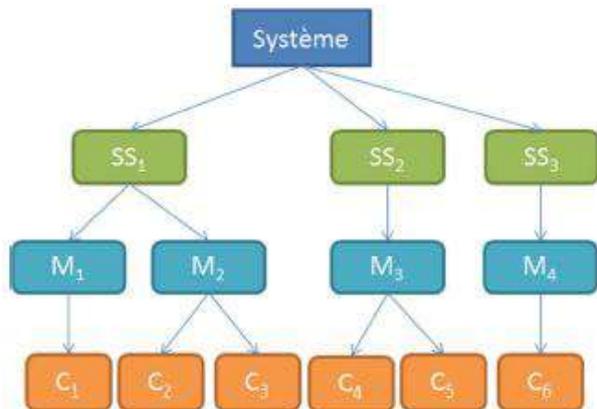


Figure 31 : Support proposée pour les métriques d'intégration physique et multi-domaines dans la thèse : Métriques d'intégration pour le choix d'architectures dans la conception de systèmes mécatroniques (Warniez 2015)

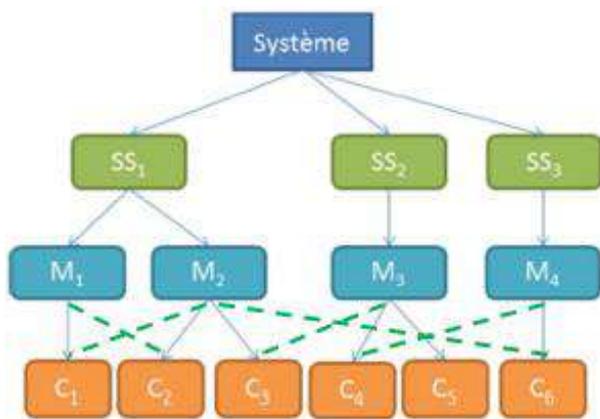
Cette approche architecturale top-down où la décomposition de la complexité s'effectue à partir du système complet jusqu'au composant mono-domaine, est modulaire (Hehenberger 2012) comme représenté sur les Figure 30 et Figure 32.



- Pas d'interconnexions (croisements)
- Les composants sont mono-domaines
- MMLI ne nous permet pas une généralisation
- Exemple: **Ordinateur fixe**

Figure 32 : Exemple d'architecture type d'un système modulaire comme l'ordinateur fixe et sa décomposition hiérarchique. Il n'y a pas de liens fonctionnels entre les sous-systèmes (M) et composants (C)

Dans les cas de l'ordinateur fixe, les composants peuvent être séparés : le clavier est séparé à la fois de l'écran et de l'unité centrale. Pour les produits intégrés cependant, un ordinateur portable par exemple, de nombreux liens entre les composants mono-domaines et les modules du niveau au-dessus peuvent être constatés, comme montré sur la Figure 33. Or ces liens ne sont plus exploitables si le composant est considéré comme n'étant plus décomposable. En effet, plusieurs composants participent à plusieurs fonctions et ne sont pas juste monofonctionnels. L'écran est par exemple lié à l'unité centrale et au clavier. Dans le cas où d'écran est tactile, l'écran remplit également certaines fonctions réservées auparavant au clavier.



- Valeur des métriques: MMLI ne nous permet pas une généralisation
- Nombreuses interconnexions entre les modules et les composants
- Exemple: **Ordinateur portable**

Figure 33 : Exemple d'architecture type d'un système intégré comme l'ordinateur portable et sa décomposition. Il convient d'observer les liens entre les sous-systèmes (M) et les composants (C). Ces liens témoignent d'une intégration fonctionnelle

Ci-après, les résultats de l'expérimentation qui ont été faits sur la base de la méthode proposée par Aude Warniez sont donnés. Pour la méthode de calcul, se référer à (Warniez 2015).

3.2.3.2. Résultats de l'expérimentation menée sur la pompe hydraulique mécatronique Poclair PWE

Cette expérimentation a été menée dans le but d'établir une différence significative entre la modularité et l'intégration d'un produit. Il va donc être possible de dire, sur l'exemple de la pompe hydraulique mécatronique Poclair PWE, si le produit est intégré ou modulaire.

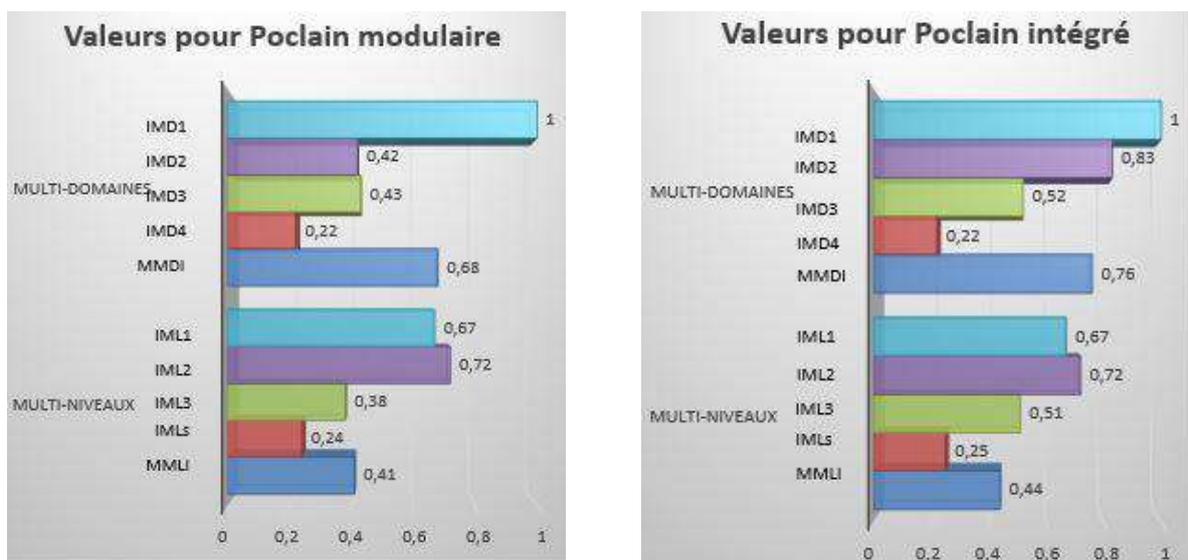


Figure 34 : Les résultats des calculs effectués sur la pompe mécatronique PWE de Poclair à l'aide de la méthode de décomposition hiérarchique proposée par Warniez (2015)

Les résultats affichés (Figure 34) ne permettent pas d'établir une différence discriminante entre la modularité et l'intégration.

3.2.4. Synthèse d'une première expérimentation

Ce travail avec l'utilisation de la méthode de décomposition hiérarchique a permis d'apporter plusieurs éclairages. Premièrement, le fait qu'un produit mécatronique doit obligatoirement être intégré fonctionnellement mais peut ne pas être intégré physiquement. Deuxièmement, la problématique de la définition du composant a été mise en exergue. Ce dernier reste toujours et encore décomposable et de même, la différence entre le sous-système et le module est difficile à établir. En effet, de nombreux liens ont été constatés entre les composants mono-domaines et les modules du niveau au-dessus comme montré dans la Figure 33.

Cette méthode de calcul (Warniez 2015), reposant sur une approche top down n'intègre pas la dimension fonctionnelle du produit et ne permet pas de décomposer le produit jusqu'au niveau où il serait possible de relier les éléments qui contribuent à la réalisation de chacune des fonctions.

Et pourtant, pour répondre à notre problématique, nous avons besoin d'une méthode, où la décomposition serait moins équivoque. C'est pour cette raison que l'on utilise l'approche bottom up, où la compilation de plusieurs fonctionnalités différentes dans un composant est possible.

Ce courant de recherche est relatif à l'impact des architectures modulaire ou intégrée d'un produit sur l'orientation de la production de l'entreprise (Ulrich 1995). Pour (Ulrich 1995), l'architecture du produit est un schéma qui montre l'attribution des fonctions aux composants physiques. Ce sont les composants physiques qui assurent les fonctionnalités du produit. L'architecture est composée d'éléments fonctionnels, de flux fonctionnels et il y a un interfaçage avec ou sans contact physique entre les éléments.

Un composant peut ainsi être défini de plusieurs façons visibles dans le Tableau 39.

1) Unité séparée physiquement ou un sous-ensemble.
2) Toute partie du produit permettant l'inclusion d'un logiciel ou d'un sous-programme.
3) Des parties distinctes d'un circuit intégré, non séparées physiquement.

Tableau 39 : Définitions d'un composant données par (Ulrich 1995)

Ces composants peuvent ensuite être couplés entre eux de différentes façons ; Ulrich parle de différentes contributions possibles d'un composant pour la réalisation d'une certaine fonction (Tableau 40).

a) Un seul composant contribue à une seule fonction.
b) Plusieurs composants contribuent à une fonction.
c) Un composant contribue à plusieurs fonctions.

Tableau 40 : Types de relations possibles entre les fonctions et les composants physiques constatés par (Ulrich 1995)

Par ailleurs, selon Ulrich, la modularité ne prend en compte que le 1^{er} type de relations entre fonctions et composants physiques soit : un seul composant contribue à une seule fonction.

3.2.5. La définition de l'indicateur d'intégration avec la prise en compte des définitions d'Ulrich

Ces différentes définitions extraites des travaux d'Ulrich, nous ont permis de proposer la notion de module fonctionnel inspirée de la définition de couplages entre les fonctions (Tableau 40).

Elle repose sur l'assertion suivante : « un ensemble d'éléments du produit qui contribuent à la réalisation de fonctions identiques est un sous-système ». Cet ensemble ou groupement d'éléments assemblés d'un système appelé module fonctionnel dans le cadre de ce travail.

Dans la partie ci-après, le cheminement qui a été nécessaire pour le définir, est donné.

3.3. La définition d'un module fonctionnel

Tout d'abord, nous avons défini le module fonctionnel (Tableau 41) :

« Tout ensemble d'éléments assemblés d'un système qui contribuent à la réalisation des mêmes fonctions est considéré comme module fonctionnel de ce système ».

Tableau 41 : Notre définition du module fonctionnel

Cette définition nous a permis de résoudre un problème crucial relatif à la possibilité de décomposer un système mécatronique de plusieurs manières comme cela a été détecté lors de la décomposition hiérarchique montrée dans les Figure 32 et Figure 33. Par le biais du module fonctionnel, la décomposition devient moins équivoque. En effet, à partir du catalogue d'un produit, il est possible d'extraire la liste de ses fonctions. Ensuite, on décompose le produit jusqu'au niveau où il n'est plus décomposable et on relie les éléments qui contribuent à la réalisation de chacune des fonctions. Enfin, on identifie les éléments non séparés physiquement qui contribuent à la réalisation des mêmes fonctions pour les considérer comme modules fonctionnels du produit.

Une illustration est visible sur la Figure 35.

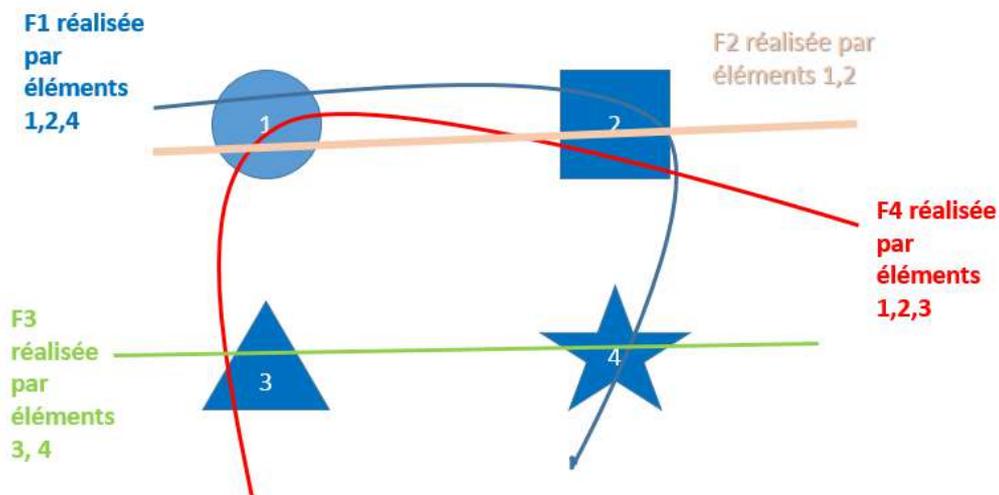


Figure 35 : Système X avant l'identification de modules fonctionnels

La Figure 35 représente un schéma de décomposition du système X en éléments non décomposables qui restent séparés physiquement sur le schéma pour une meilleure compréhension de la suite.

Dans cet exemple :

- l'élément 1 contribue à la réalisation des fonctions F1, F2 et F4,
- l'élément 2 contribue à la réalisation des fonctions F1, F2 et F4,
- l'élément 3 contribue à la réalisation des fonctions F3 et F4
- et l'élément 4 contribue à la réalisation des fonctions F1 et F3.

On constate que les éléments 1 et 2 contribuent à la réalisation des mêmes fonctions F1, F2 et F4 ; ils doivent donc, selon la définition donnée précédemment, faire partie du même module fonctionnel. Les éléments 3 et 4 contribuent certes à la réalisation de la même fonction F3 mais chacun d'entre eux participe dans une fonction où l'autre ne participe pas ; ils font donc partie de deux modules fonctionnels différents.

Les éléments 1 et 2 de la Figure 35 sont donc fusionnés en un seul élément dénommé module fonctionnel A. Ce regroupement est visible sur la Figure 36.

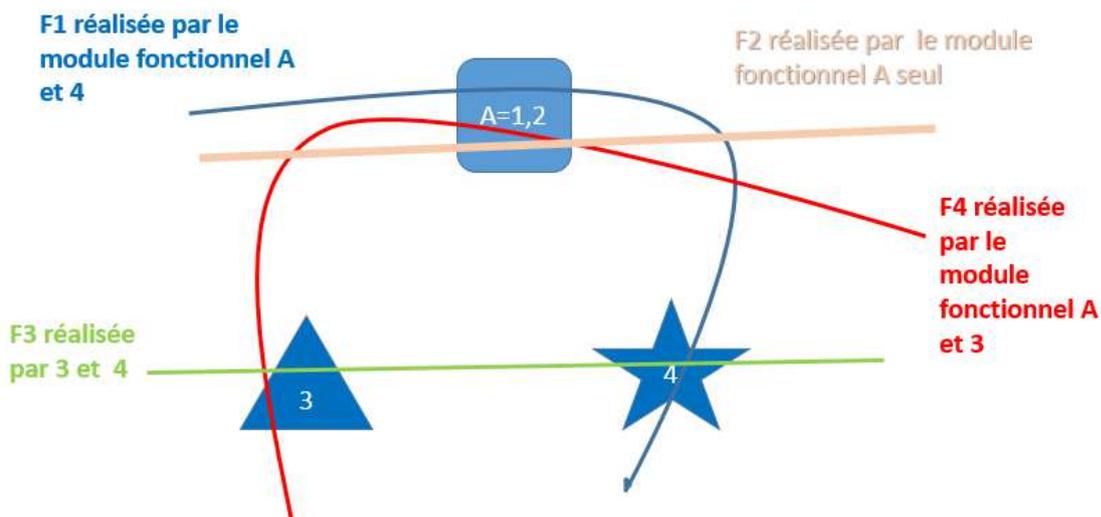


Figure 36 : Système X après l'identification du module fonctionnel A

3.4. Proposition de trois métriques fonctionnelles, d'une méthode de calcul et leur application sur des produits

Dans cette partie, plusieurs métriques fonctionnelles sont proposées, dont trois ont été testées sur des produits. On propose également une méthode de calcul en six étapes, reposant sur des outils simples et facilement applicables.

La métrique fonctionnelle actuellement testée est donc composée de trois indicateurs d'intégration : l'indicateur d'intégration fonctionnelle, l'indicateur de dématérialisation fonctionnelle et l'indicateur de complexité fonctionnelle.

Dans la suite du texte, le développement et l'application des trois indicateurs testés est donné. La liste de quatre autres métriques proposées mais non testées est consultable dans l'Annexe 13.

3.4.1. Définir l'environnement du produit

Tout d'abord, à l'aide de l'analyse fonctionnelle, il faut réaliser un diagramme pieuvre en reliant le produit à son environnement comme montré dans la Figure 37.

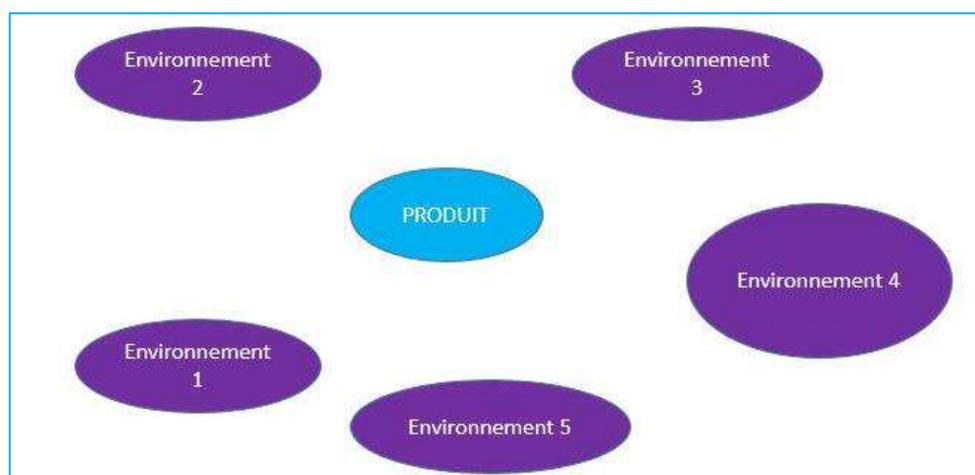


Figure 37 : Définition de l'environnement du produit

3.4.2. Lister les fonctions du produit

Après avoir défini l'environnement du produit, il faut dresser la liste des fonctions que ce dernier remplit comme montré sur la Figure 38. Pour cette étape, il faut prendre la liste de fonctions réalisées par le produit à partir du catalogue s'il existe, d'une spécification technique, de la nomenclature d'un produit ou encore en décomposant un produit en rétro-ingénierie.

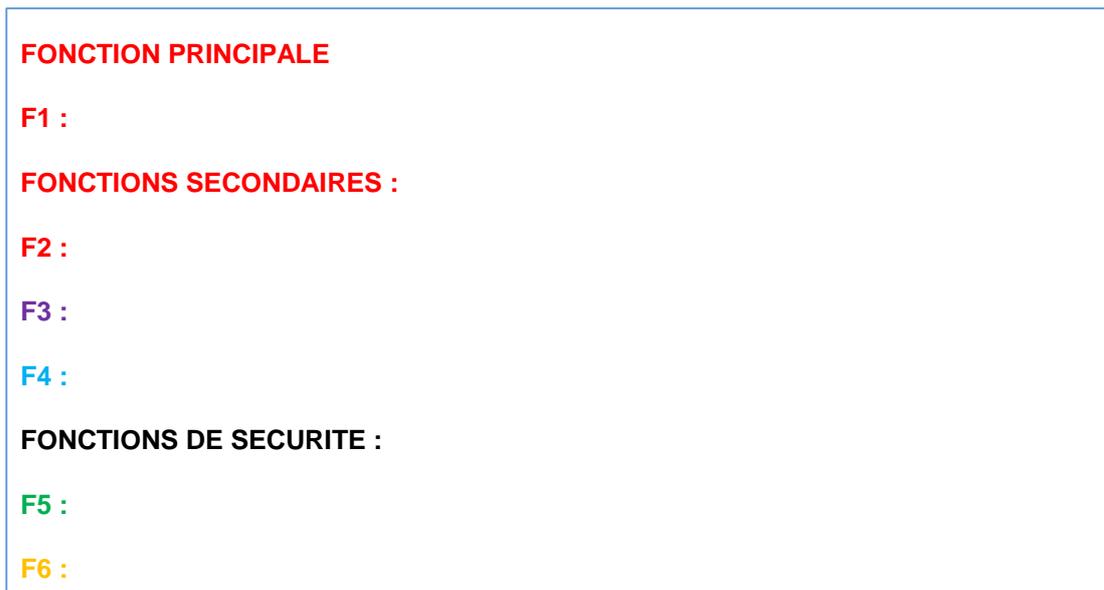


Figure 38 : Liste des fonctions remplies par le produit

3.4.3. Lier environnement et fonctions

Il faut ensuite positionner les fonctions par rapport à l'environnement du produit comme montré dans la Figure 39.

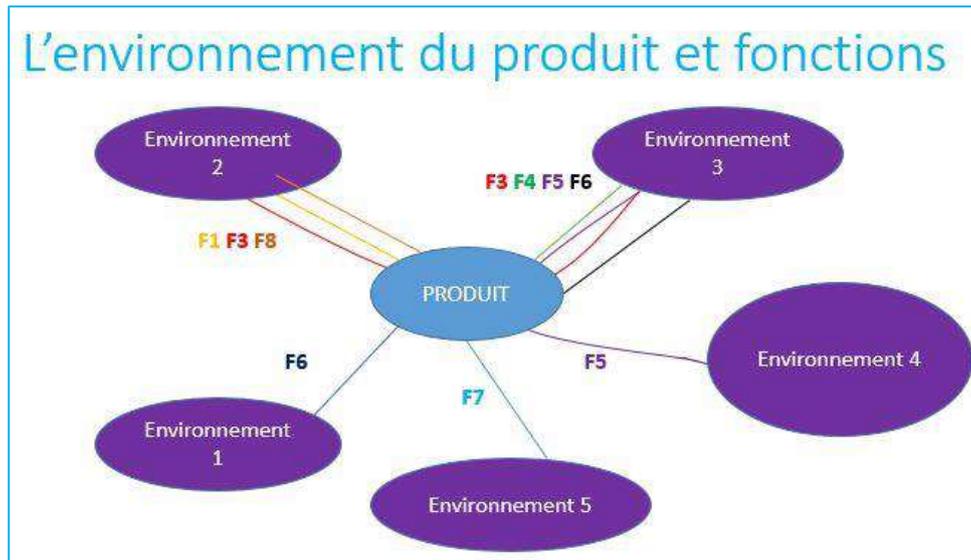


Figure 39 : Environnement et fonctions liés

3.4.4. Réaliser le diagramme de flux fonctionnels

Dans cette étape, il s'agit de constituer la liste de tous les éléments du produit à partir du catalogue commercial, d'une spécification technique, de la nomenclature ou encore en décomposant un produit en rétro-ingénierie. Ces éléments sont ensuite regroupés en modules fonctionnels comme expliqué dans les Figure 35 et Figure 36 par rapport aux fonctions qu'ils remplissent. Tous ces éléments sont ensuite reliés à l'environnement comme montré sur la Figure 40. Les éléments qui contribuent à la réalisation de mêmes fonctions sont ensuite regroupés en modules fonctionnels comme montré sur la Figure 41.

Ce dernier diagramme permet de compter le nombre de fonctions remplies par chaque module fonctionnel. Cet indicateur sera nécessaire à la détermination des métriques définies.

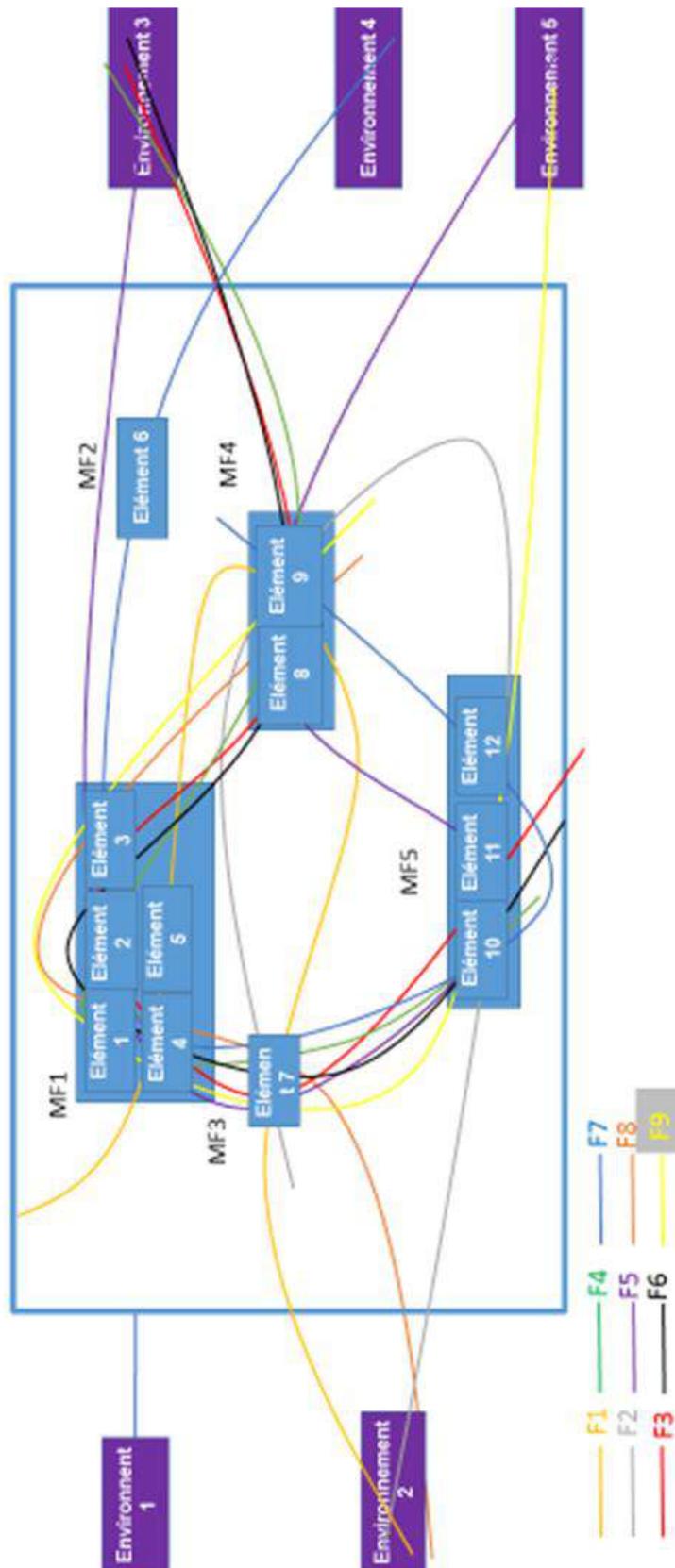


Figure 40 : Diagramme de flux fonctionnels avec tous les éléments constitutifs du produit

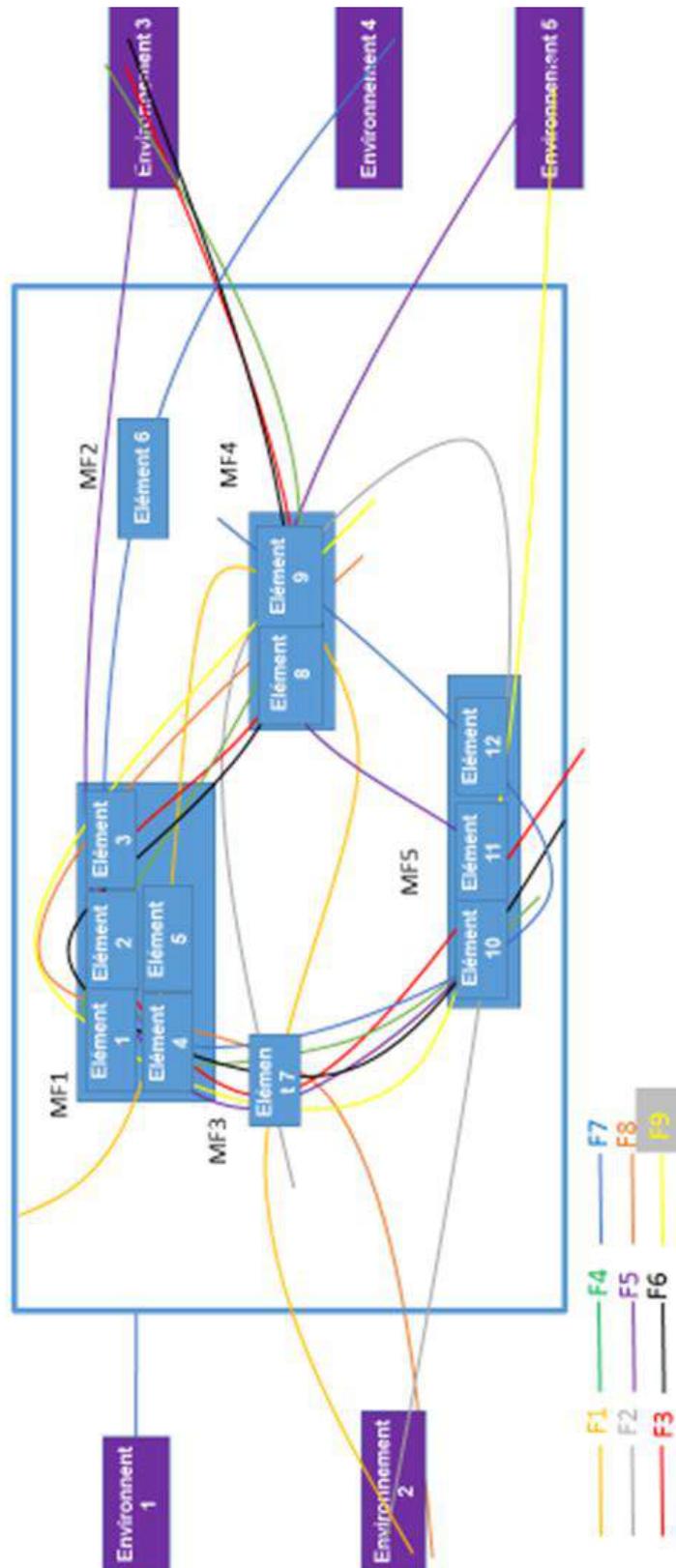


Figure 41 : Diagramme de flux fonctionnels avec regroupement d'éléments en modules fonctionnels MF

3.4.5. Construire un tableau d'incidence et appliquer les métriques proposées

Après avoir réalisé le diagramme de flux fonctionnels, il s'agit de construire, sous Excel, un tableau que nous avons appelé tableau d'incidence. Il est utile pour le comptage du nombre de fonctions remplies par chaque module fonctionnel et sert de base pour le calcul des trois principaux indicateurs de mesure de maturité mécatronique d'un produit.

Il s'agit de construire le tableau d'incidence (Tableau 42) en mettant en titre de colonne toutes les fonctions F et en titre de ligne tous les modules fonctionnels MF. Il suffit ensuite de mettre un 1 dans les cases quand le module fonctionnel répond à la fonction et 0 sinon.

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Tableau 42 : Préparer le tableau d'incidence

Dans le Tableau 43, la somme des modules fonctionnels par fonction est calculée (cases vertes) ainsi que le nombre moyen de modules fonctionnels par fonction (en bleu).

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	3	4	4	3	4	5	3	4
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,8

Tableau 43 : Calcul de différentes moyennes

3.4.5.1. L'Indicateur d'intégration fonctionnelle maximale *IntegMax*

La première proposition concerne l'indicateur d'intégration fonctionnelle qui mesure le degré de collaboration de composants dans la réalisation de fonctions. Concrètement, il indique le nombre moyen de modules fonctionnels contribuant à une fonction et sa moyenne.

Il est formalisé comme suit :

Équation 2

$$IntegMax = \frac{\sum_{fonctions} \text{Nombre de modules fonctionnels par fonction} - 1}{\text{Nombre de fonctions} \times (\text{Nombre de modules fonctionnels} - 1)}$$

Afin de pouvoir comparer l'intégration fonctionnelle entre différents produits, nous l'avons normalisé : il est donc compris entre 0 et 1.

S'il est égal à 0, cela veut dire que le produit est modulaire fonctionnellement et que chaque fonction est réalisée par un et un seul module fonctionnel. Chaque module

fonctionnel du produit accomplit donc une seule tâche indépendamment des autres modules fonctionnels du produit.

Si cet indicateur est égal à 1, cela veut dire que chaque module fonctionnel du produit contribue à la réalisation de toutes les fonctions de celui-ci. D'après notre définition du module fonctionnel, le produit devient donc un seul module fonctionnel.

Bornes :

$IntegMax = 1$: chaque module fonctionnel du système contribue à la réalisation de toutes les fonctions remplies par le produit (très forte intégration)

$IntegMax = 0$: le système est modulaire car chaque fonction est réalisée par un seul module fonctionnel du système

Ensuite, sont calculées de manière automatique la moyenne des deux lignes qui viennent d'être créées (entourées dans le Tableau 44) à l'aide de l'indicateur d'intégration fonctionnelle présenté par l'Équation 2.

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1	
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	3	4	4	3	4	5	3	4	3,67
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,8	0,73

Tableau 44 : Calculs : nombre de modules fonctionnels répondant à une fonction et sa moyenne entourées de rouge

Dans cet exemple, on prend la moyenne du nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction soit 3,67 dont on soustrait 1 pour les besoins de la

normalisation et l'on divise le tout par le nombre de modules fonctionnels moins 1 : $(3,67-1)/(5-1) = 0,67$ comme visible dans le Tableau 45.

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	IntegMax
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0,67
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	3	4	4	3	4	5	3	4	3,67
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,8	0,73

Tableau 45 : Calcul de l'indicateur d'intégration fonctionnelle maximale : IntegMax pour cet exemple donnant 0,67

3.4.5.2. L'indicateur de dématérialisation fonctionnelle DemMax

La deuxième proposition concerne l'indicateur de dématérialisation qui mesure le degré d'intégration de domaines électronique « E », informatique « I » et automatique « A » dans le produit. Cet indicateur reflète le niveau de communication, d'intelligence, d'autonomie et de gain en performance d'un produit mécatronique. Afin de le calculer, l'ingénieur ou le technicien doit préalablement reconnaître l'implication des trois domaines EIA : électronique, informatique et automatique dans la réalisation des fonctions du produit. Pour cela, il doit revisiter les schémas précédents tout en partant de la liste des fonctions. En effet, il doit regarder quel élément technologique des trois domaines (Electronique, Informatique, Automatique) assure une fonction donnée. Il est conseillé de réaliser cette étape au fur et à mesure de la décomposition du produit comme montré sur la Figure 40.

Ces trois domaines donnent au produit une valeur ajoutée puisqu'ils permettent de réaliser de nouvelles fonctions telles que la détection, le traitement de l'information et la communication et favorisent ainsi son gain en performance. En effet, plus ces

domaines sont présents dans un produit mécatronique et plus il devient intelligent, autonome, communicant et donc performant. C'est par le biais de ces domaines que l'on fait des produits réalisant plusieurs tâches au lieu d'une seule et que l'on arrive à les contrôler et à les programmer pour les adapter aux exigences et besoins des utilisateurs.

L'indicateur de dématérialisation fonctionnelle $DemMax$. Il est la somme de quatre indicateurs intermédiaires qui sont l'indicateur de fonctions relatives aux fonctions électroniques, informatiques et automatiques $DemMax_{EIA}$, l'indicateur d'information, $DemMax_{INFO}$, de diagnostic $DemMax_{DIAG}$ et d'intervention $DemMax_{INTERV}$.

Le premier indicateur, $DemMax_{EIA}$, exprime le rapport entre le nombre de fonctions remplies par le produit par rapport au nombre de fonctions où l'électronique, l'informatique et l'automatique sont présents. Il est donné par la formule suivante :

Équation 3

$$DemMax_{EIA} = \frac{\text{Nombre de fonctions EIA}}{\text{Nombre de fonctions du produit}}$$

Afin d'éviter un biais relatif au fait que le produit ainsi défini détecte et informe mais qu'il ne réagit pas automatiquement, ou encore, qu'un produit détecte et réagit automatiquement mais qu'il n'informe pas, nous proposons d'introduire trois autres indicateurs. Ces indicateurs complémentaires prennent en compte plusieurs paramètres afin de mesurer à quel degré un produit mécatronique détecte, informe et réagit automatiquement.

Le taux obtenu à partir du précédent calcul (Équation 3) devient le dénominateur dans le calcul des trois autres indicateurs qui sont l'indicateur d'information, $DemMax_{INFO}$, de diagnostic $DemMax_{DIAG}$ et d'intervention $DemMax_{INTERV}$. Ces trois indicateurs nous permettent de mesurer le taux d'information d'un produit, son taux de détection et son taux de réponse automatique. En d'autres termes, ces indicateurs nous permettent de savoir à quel degré un produit mécatronique est intelligent et autonome et se calculent comme selon les formules proposées ci-dessous :

Équation 4

$$DemMax_{INFO} = \frac{\text{Nombre de fonctions d'information}}{\text{Nombre de fonctions EIA}}$$

Équation 5

$$DemMax_{DIAG} = \frac{\text{Nombre de fonctions de diagnostic}}{\text{Nombre de fonctions EIA}}$$

Équation 6

$$DemMax_{INTERV} = \frac{\text{Nombre de fonctions d'intervention}}{\text{Nombre de fonctions EIA}}$$

L'indicateur de dématérialisation fonctionnelle *DemMax* devient ainsi la somme pondérée des quatre indicateurs que nous venons d'introduire :

Équation 7

$$DemMax = \sum_{i=1}^{i=4} \lambda_i DemMax_i$$

Bornes :

λ_i = la somme des pondérations

i = fonctions *EIA*, *INFO*, *DIAG* ou *INTERV*

Les coefficients λ_i définissent les poids des indicateurs. La somme de ceux-ci doit être égale à 1. Dans notre étude, nous avons considéré que les 4 indicateurs sont de même importance, soit 0,25.

Plus l'indicateur *DemMax* se rapproche de 1, plus les domaines de dématérialisation dont l'électronique, l'informatique et l'automatique sont présents dans le produit.

Le tableau d'incidence est alors complété par la ligne Fonctions EIA (en rose) avec 1 dans la colonne de chaque fonction si au moins un module fonctionnel appartient aux domaines EIA, comme montré dans le Tableau 46. En fin de la ligne Fonctions EIA, la somme des fonctions EIA est calculée.

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	IntegMax
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0,67
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	3	4	4	3	4	5	3	4	3,67
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,8	0,73
Fonctions EIA	1	1	1	1	1	1	0	1	1	8

Tableau 46 : Calcul des fonctions EIA présentes dans le produit étudié

On peut ensuite calculer le premier indicateur intermédiaire à l'aide de l'Équation 3 (Tableau 47) :

$$DemMax_{EIA} = \frac{8}{9} = 0,89$$

Ensuite, des lignes du tableau d'incidence sont créées pour sommer les fonctions d'information, de diagnostic et d'intervention (Tableau 47) et calculer les 3 autres indicateurs intermédiaires à l'aide respectivement des Équation 4, Équation 5 et Équation 6 :

$$DemMax_{INFO} = \frac{7}{8} = 0,88$$

$$DemMax_{DIAG} = \frac{7}{8} = 0,88$$

$$DemMax_{INTERV} = \frac{4}{8} = 0,5$$

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9				
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1				
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1		IntegMax		
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1		0,67		
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0				
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	3	4	4	3	4	5	3	4	3,67			
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,8	1	0,6	0,8	0,73			
Fonctions EIA	1	1	1	1	1	1	0	1	1	8	DemMax EIA	0,89	
Fonctions d'information (Communication)	1	1	1	1	1	1	0	0	1	7	DemMax INFO	0,88	
Fonctions de diagnostic (Détection)	1	1	1	1	1	1	0	0	1	7	DemMax DIAG	0,88	DemMax
Fonctions d'intervention (Réaction automatique)	1	1	0	0	1	0	0	1	0	4	DemMax INTERV	0,50	0,78

Tableau 47 : Calcul des 4 indicateurs de dématérialisation intermédiaires

L'indicateur de dématérialisation fonctionnelle maximale $DemMax$ est alors calculé suivant l'Équation 7 :

$$DemMax = 0,78$$

3.4.5.3. L'indicateur de complexité fonctionnelle $ComplexiMax$

La troisième proposition concerne l'indicateur d'intégration physique que nous avons désigné de complexité fonctionnelle. Etant donné que les produits mécatroniques sont des produits complexes, il est judicieux d'évaluer cette complexité. Cette dernière reflète notamment l'expertise du constructeur et sa capacité à répondre aux exigences de ses clients.

L'indicateur de complexité reflète donc le niveau d'interpénétration entre les éléments appartenant aux différents domaines existant dans chacune des fonctions du produit.

Dans un premier temps, nous nous apprêtons à mesurer la complexité de produits mécatroniques par le biais de leurs fonctions contraintes qui reflètent la limitation de la liberté du constructeur et sa capacité à faire le produit tout en respectant un bon

nombre de contraintes. Mais ultérieurement, nous avons trouvé plus pertinent de mesurer la complexité de produits à travers le cumul de leurs fonctions y compris leurs fonctions contraintes, sous-entendues dans l'expression de fonctions de service qui, dans un premier temps, sont liées à l'analyse fonctionnelle et ultérieurement à la formulation de l'offre.

La complexité des fonctions de produits mécatroniques provient de leur caractère multi-domaine. En effet, plus le nombre de domaines d'un produit augmente et plus il devient complexe à concevoir et à fabriquer. D'une part, la communication entre les spécialistes des différents domaines devient plus difficile à assurer et d'autre part, l'interpénétration entre les composants des différents domaines et l'adaptation des réglages des uns pour assurer le bon fonctionnement avec les autres requièrent une expérience et une expertise conséquentes.

Afin de mesurer la complexité de produits mécatroniques, nous proposons un indicateur qui prend en compte les couplages entre domaines existants dans chacune des fonctions du produit. Cet indicateur est donné par la relation suivante :

Équation 8

$$\text{ComplexiMax} = \frac{1}{28} \times \frac{\sum_i \text{Nombre de couplages par fonction } i}{\text{Nombre de fonctions}}$$

Le nombre 28 est le nombre de couplages possibles entre les 8 domaines retenus, soit : mécanique, électronique, contrôle commande-automatique, informatique, hydraulique – pneumatique, optique, magnétisme et thermique. Ces derniers ont été retenus sur une base d'observation ; les quatre premiers sont fortement présents dans ces produits et les autres commencent à l'être de plus en plus.

Le calcul du nombre de couplages possibles se fait par la formule suivante :

Équation 9

$$\text{Nombre de couplages possibles} = \frac{n(n-1)}{2}$$

Pour un usage facilité, le Tableau 48 restitue le nombre de couplages possibles d'une façon visuelle.

Nombre de domaines	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de couplages possibles	0	1	3	6	10	15	21	28

Tableau 48 : Nombre de couplages en fonction du nombre de domaines

Bornes de l'indicateur :

$ComplexiMax = 0$: Le produit est mono-domaine et donc pas mécatronique.

$ComplexiMax = 1$: Les 8 domaines sont présents dans toutes les fonctions du produit, le produit est fortement mécatronique (à notre connaissance, un tel produit n'existe pas encore).

L'indicateur de complexité reflète donc le niveau d'interpénétration entre les éléments appartenant aux différents domaines existants dans chacune des fonctions du produit.

L'ingénieur ou le technicien doit déterminer le nombre de domaines n contribuant à la réalisation de chaque fonction comme montré dans le Tableau 49 et le nombre de couplages possibles se calcule ensuite à l'aide de l'Équation 9.

9 FONCTIONS 5 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	
MF 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
MF 2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
MF 3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
MF 4	0	1	1	1	1	1	1	0	1	
MF 5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Mécanique	1	1	0	0	1	1	1	1	1	
Electronique	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
Contrôle commande-automatique	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
Informatique	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
Hydraulique et pneumatique	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
Optique	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Magnétisme	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Thermique	0	0	1	1	1	1	0	0	1	
NOMBRE DE DOMAINES CONTRIBUANT A LA FONCTION	5	5	5	5	6	6	1	5	6	ComplexiMax
NOMBRE DE COUPLAGES CONTRIBUANT A LA FONCTION	10	10	10	10	15	15	0	10	15	0,38

Tableau 49 : Calcul de l'indicateur de complexité fonctionnelle *ComplexiMax*

Dans cet exemple, il y a donc 3 fonctions avec 6 domaines donc avec 15 couplages, 5 fonctions avec 5 domaines donc avec 10 couplages et 1 fonction avec 1 seul domaine donc sans couplage.

L'indicateur de complexité fonctionnelle *ComplexiMax* vaut donc (Équation 8) :

$$ComplexiMax = \frac{1}{28} \times \frac{3 \times 15 + 5 \times 10 + 1 \times 0}{9} = 0,38$$

3.5. Illustration sur deux produits industriels

Ici sont présentés deux exemples qui démontrent de façon quantitative l'évolution de mécatronicité sur 2 générations de produits dans l'entreprise Poclain. Le premier produit est la pompe hydraulique PW simple et le second la pompe hydraulique PWe mécatronique comme présenté sur la Figure 42.

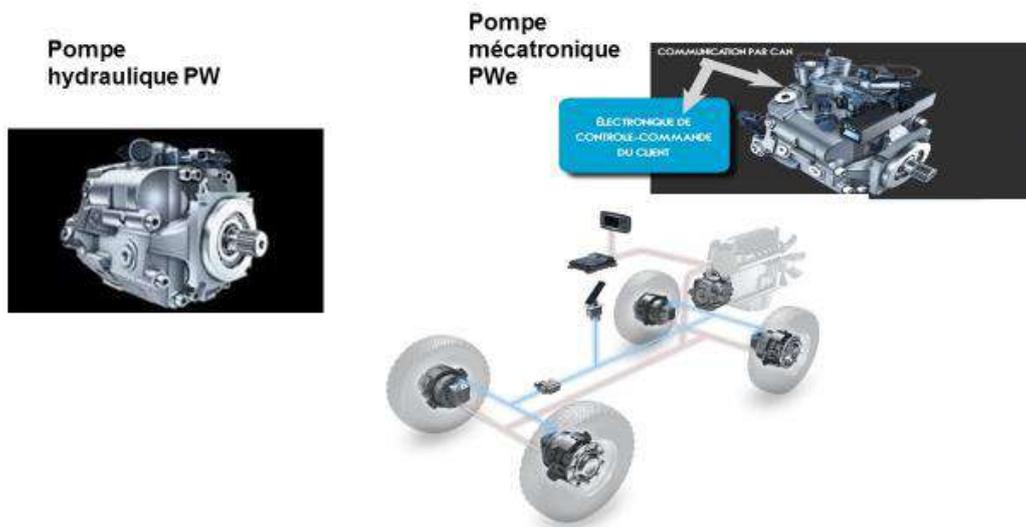


Figure 42 : Application des métriques sur deux produits Poclain PW et Pwe

3.5.1. La pompe hydraulique Poclain PW simple

Tout d'abord, l'environnement du produit Poclain PW avec lequel le produit interagit a été défini comme visible sur la Figure 43.



Figure 43 : L'environnement du produit Poclain PW

Ensuite, les fonctions du produit ont été listées sur la Figure 44.

Fonctions

- F1 Alimenter des moteurs hydrauliques pour faire déplacer un véhicule
- F12 Se fixer sur le moteur thermique

Figure 44 : Fonctions du produit PW

Les fonctions et l'environnement du produit ont été reliés comme montré sur la Figure 45.



Figure 45 : L'environnement et fonctions du produit Poclairn PW liés

Ensuite, le diagramme de flux fonctionnels a été réalisé comme montré sur la Figure 46.

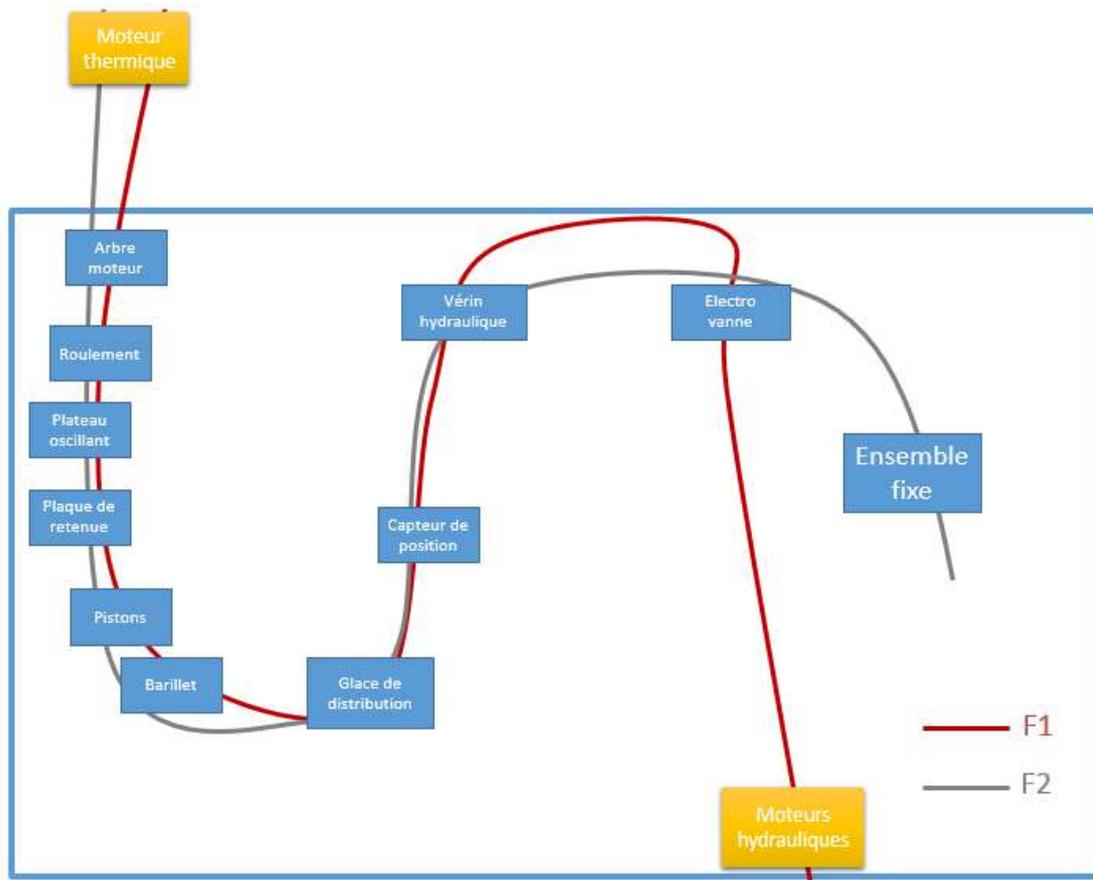


Figure 46 : Diagramme de flux fonctionnels Poclairn PW

Les éléments de flux fonctionnels ont été groupés en 2 modules fonctionnels comme montré sur la Figure 47.

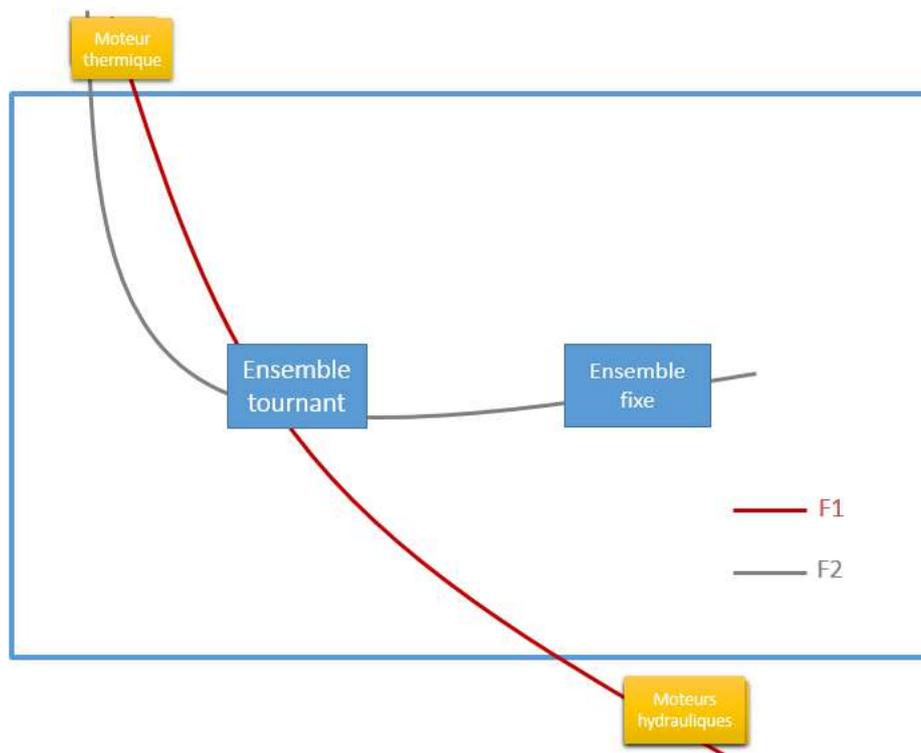


Figure 47 : Diagramme de flux Poclairn PW avec regroupement d'éléments en modules fonctionnels

Le degré de collaboration entre les modules fonctionnels pour la réalisation de fonctions qui est déterminé par l'indicateur IntegMax est calculé comme montré sur le Tableau 50.

2 FONCTIONS 2 MODULES FONCTIONNELS	F1 Alimenter des moteurs hydrauliques pour faire déplacer un véhicule	F2 Se fixer sur le moteur		
Ensemble fixe	0	1		
Ensemble tournant	1	1		
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	1	2	1,50	IntegMax
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,5	1	0,75	0,50

Tableau 50 : Tableau d'incidence pour faciliter le calcul du niveau d'intégration du produit Poclairn PW

Le résultat suivant a été obtenu : $IntegMax = \frac{0,75}{1,5} = 0,5$ indique qu'il y a une collaboration entre les modules fonctionnels.

Nous sommes ensuite passés à l'aspect instrumenté du produit représenté par les fonctions de communication, de détection et de réaction automatique qui représentent le degré de dématérialisation du produit (Tableau 51).

2 FONCTIONS 2 MODULES FONCTIONNELS	F1 Alimenter des moteurs hydrauliques pour faire déplacer un véhicule	F2 Se fixer sur le moteur			
Fonctions EIA	1	0	1	0,50	
Fonctions d'information (Communication)	1	0	1	1,00	
Fonctions de diagnostic (Détection)	0	0	0	0,00	DemMax
Fonctions d'intervention (Réaction automatique)	0	0	0	0,00	0,38

Tableau 51 : Tableau d'incidence pour faciliter le calcul du degré de dématérialisation du produit Poclairn PW

Le tableau d'incidence montre que le produit PW ne possède qu'une fonction d'information. La dématérialisation fonctionnelle DemMax du produit vaut 0,38 avec :

$$DemMax_{EIA} = 0,5$$

$$DemMax_{INFO} = 1$$

$$DemMax_{DIAG} = 0$$

$$DemMax_{INTERV} = 0$$

Ce résultat indique que les domaines électronique, informatique et automatique ne sont pas fortement présents dans le produit PW.

Le dernier indicateur qui a été calculé est l'indicateur de complexité fonctionnelle, fortement lié au nombre de couplages présents dans chaque fonction. Dans le cas présent, il y a 2 couplages dans la fonction 1 et 1 couplage dans la fonction 2 comme montré dans le Tableau 52.

2 FONCTIONS 2 MODULES FONCTIONNELS	F1 Alimenter des moteurs hydrauliques pour faire déplacer un véhicule	F2 Se fixer sur le moteur	
Mécanique	1	1	
Electronique	1	0	
Contrôle commande-automatique	0	0	
Informatique	0	0	
Hydraulique et pneumatique	0	0	
Optique	0	0	
Magnétisme	0	0	
Thermique	0	0	
NOMBRE DE DOMAINES CONTRIBUTANT A LA FONCTION	2	1	Complexi Max
NOMBRE DE COUPLAGES CONTRIBUTANT A LA FONCTION	1	0	0,02

Tableau 52 : Tableau d'incidence pour faciliter le calcul du degré de complexité du produit Poclairn PW

On obtient alors le résultat suivant :

$$ComplexiMax = \frac{1}{28} \times \frac{1}{2} = 0,02$$

Ce nombre plutôt faible correspond bien au produit étudié qui ne présente que très peu de couplages.

3.5.2. Synthèse des indicateurs évalués sur la pompe PW

La pompe PW est un produit hydraulique et mécanique faiblement instrumenté avec de l'électronique. Il présente donc un très faible degré de mécatronicité (Figure 48).

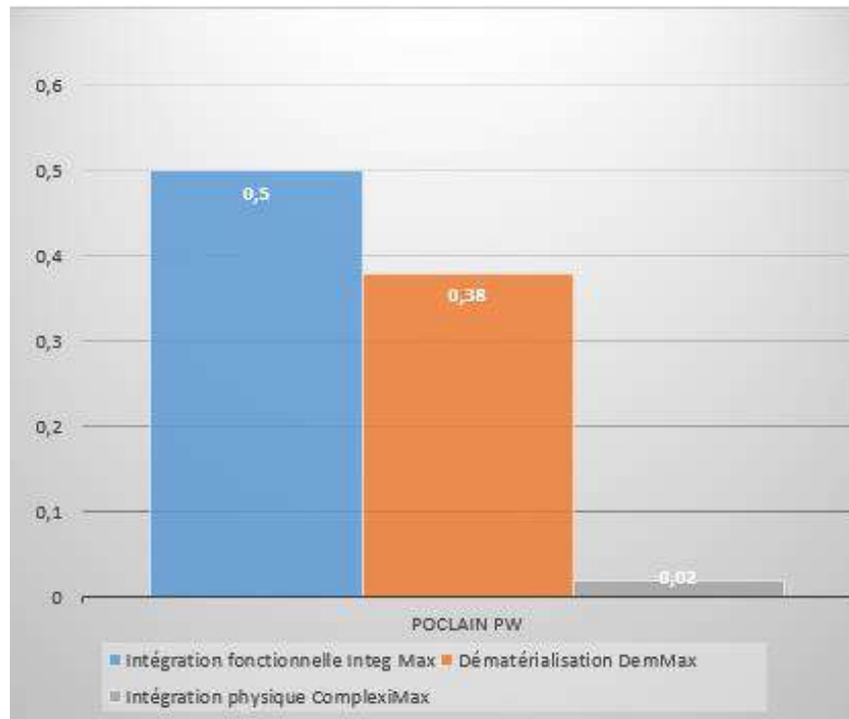


Figure 48 : La représentation du degré de mécatronicité de la pompe Poclairn PW

3.5.3. La pompe hydraulique Poclairn PWe

De la même façon que dans la section précédente, l'environnement et les fonctions sont définis et le produit est décomposé en éléments qui sont ensuite groupés en modules fonctionnels et les fonctions sont analysées.

Tout d'abord, l'environnement du produit Poclairn PWe est défini (Figure 49).

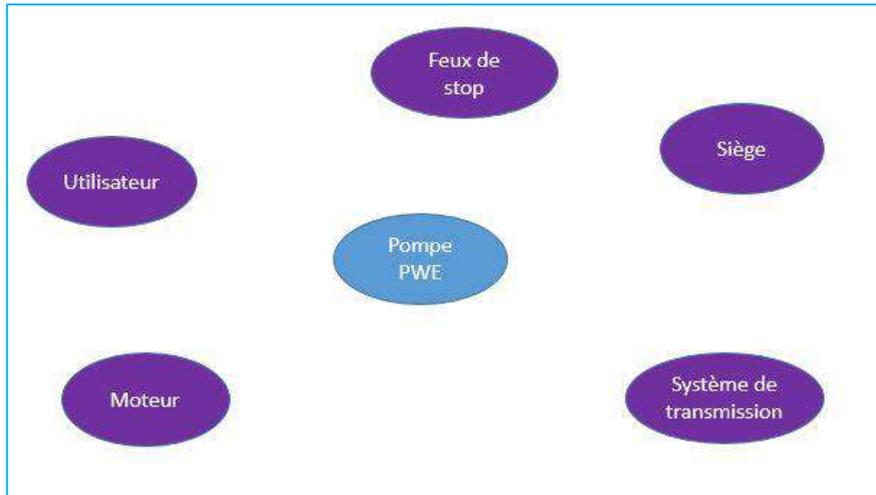


Figure 49 : L'environnement du produit Poclairn PWe

Ensuite, les fonctions que remplit le produit sont listées (Figure 50).

Fonction principale

- F1 Alimenter des moteurs hydrauliques pour faire déplacer un véhicule

Interface homme-machine

- F2 Détecter la présence du conducteur
- F3 Communiquer l'état de la machine au conducteur
- F4 Piloter dynamiquement le système

Sécurité

- F5 Assurer le démarrage du système en côte
- F6 Piloter le système au démarrage
- F7 S'assurer que l'on ne dépasse pas les capacités du moteur thermique
- F8 Ne pas aller au-delà des limites des moteurs hydrauliques
- F9 Protéger et réguler en cas de surpression
- F10 Contrôler la vitesse (en mode proportionnel, en mode fixe, en mode combiné)
- F11 Contrôler l'allumage des feux de stop
- F12 Se fixer sur le moteur
- F13 Protéger le moteur thermique d'un calage éventuel

Figure 50 : Fonctions du produit Poclairn PWe

Les fonctions et l'environnement du produit sont reliés comme l'illustre la Figure 51.

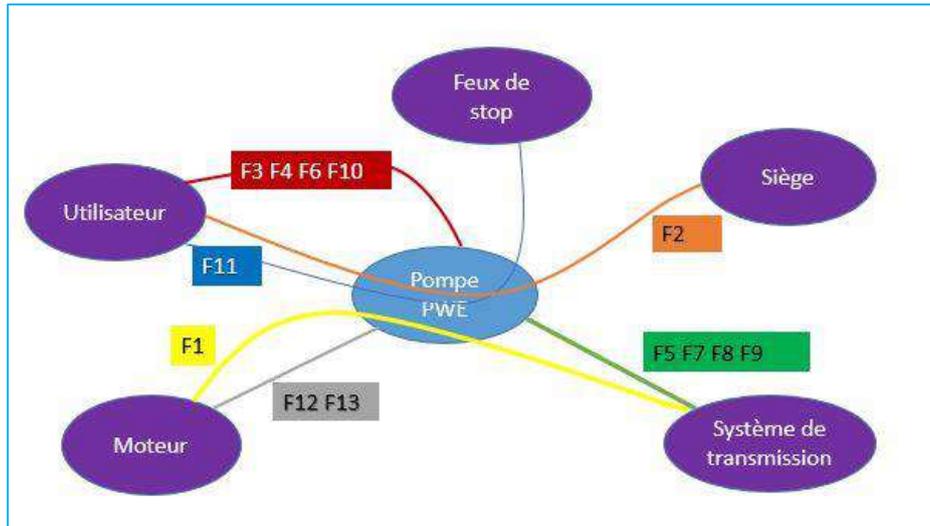
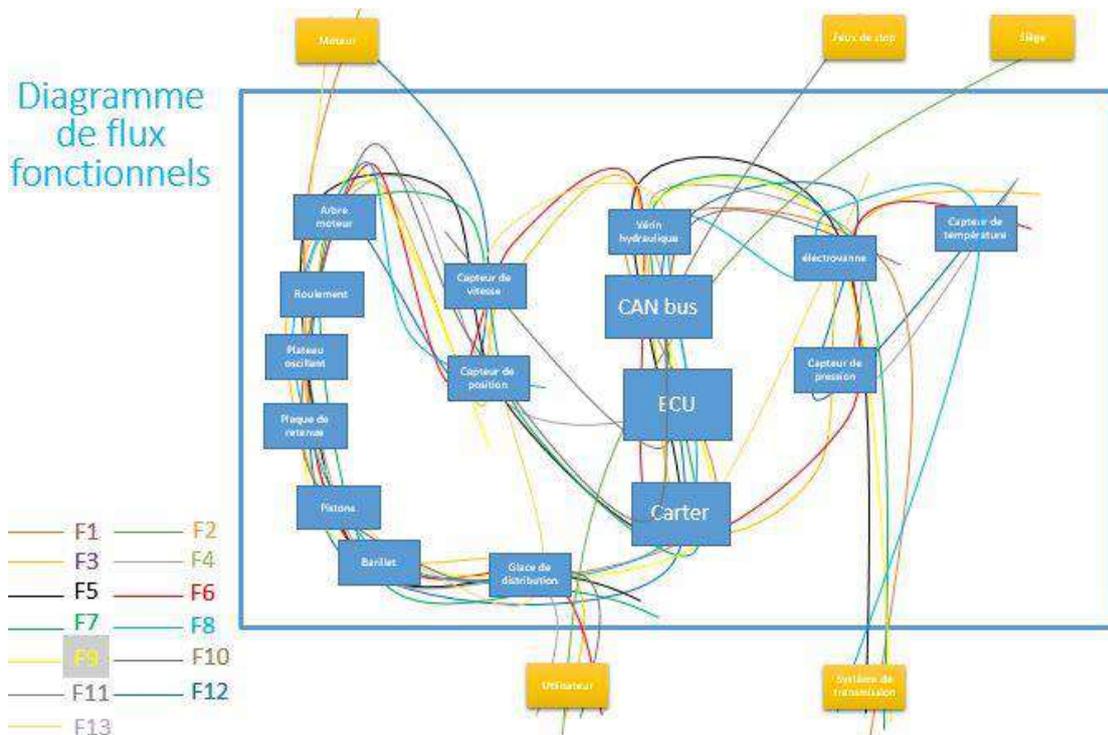


Figure 51 : L'environnement et fonctions du produit Poclair PWe liés

Un diagramme de flux fonctionnels est réalisé (Figure 52).



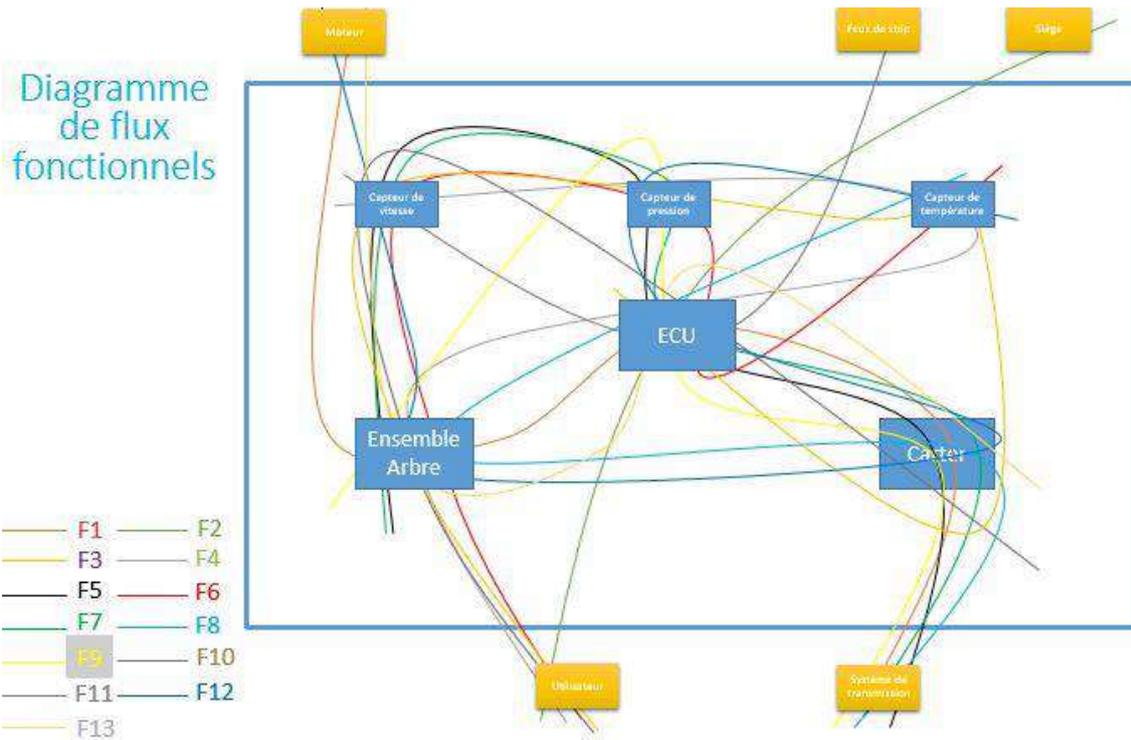


Figure 52 : Diagrammes de flux fonctionnels Poclair PWe avant et après l'identification des modules fonctionnels

Les éléments du diagramme de flux fonctionnels sont groupés en modules fonctionnels et le tableau d'incidence est complété (Tableau 53).

13 FONCTIONS 6 MODULES FONCTIONNELS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	
ECU	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Carter	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	
Capteur de pression	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	
Ensemble arbre moteur	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	IntegMax
Capteur de vitesse	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0,63
Capteur de température	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	
Nombre de modules fonctionnels contribuant à une fonction	3	1	6	5	5	5	5	4	4	4	2	6	4	4,15
Moyenne de modules fonctionnels contribuant à une fonction	0,50	0,17	1,00	0,83	0,83	0,83	0,83	0,67	0,67	0,67	0,33	1,00	0,67	0,63

Tableau 53 : Extrait du tableau d'incidence pour faciliter le calcul du niveau d'intégration du produit Poclair PWe

Le degré de collaboration est calculé entre les modules fonctionnels pour la réalisation des fonctions : $IntegMax = 0,63$. Ce résultat indique, qu'il y a une collaboration importante entre les modules fonctionnels.

Ensuite, l'aspect instrumenté du produit représenté par les fonctions d'information, de diagnostic et d'intervention qui représentent le degré de dématérialisation du produit, est évalué comme montré sur la Figure 53.

$$\begin{aligned}
 DemMax_{EIA} &= \frac{12}{13} = 0,92 & DemMax_{DIAG} &= \frac{10}{12} = 0,83 \\
 DemMax_{INFO} &= \frac{10}{12} = 0,83 & DemMax_{INTERV} &= \frac{8}{12} = 0,67 \\
 DemMax_{\square} &= \sum_{i=1}^{i=4} \lambda_i DemMax_i = 0,81
 \end{aligned}$$

Figure 53 : Calculs effectués pour l'indicateur DemMax du produit Poclain PWe

Son degré de dématérialisation maximale est de 0,81. Ce résultat indique que les domaines électronique, informatique et automatique sont fortement présents dans le produit PWe.

Le dernier indicateur calculé est l'indicateur de complexité fonctionnelle. Dans le cas présent, pour les 13 fonctions listées, il y a 10 fonctions touchant à 6 domaines soit avec 15 couplages et 2 fonctions touchant à 3 domaines soit avec 2 couplages. En nous référant à la Figure 54, nous obtenons le résultat suivant :

$$ComplexiMax = \frac{1}{28} \times \frac{3 \times 15 + 5 \times 10 + 1 \times 0}{9} = 0,38$$

Figure 54 : Calculs effectués pour l'indicateur Complexité fonctionnelle du produit Poclain PWe

Ce résultat s'explique par la différence entre le nombre de couplages de ce produit et ceux d'un produit qui combine 8 domaines (qui n'existe pas encore !). Néanmoins, la pompe PWe de Poclain affiche un haut degré de mécatronicité.

3.5.4. Résumé sur la pompe Poclain PWe

La pompe PWe est un produit hautement intégré, dématérialisé et complexe. Sa maturité mécatronique permettra une commercialisation diversifiée du produit.

Le résumé de cette évaluation relative à la pompe hydraulique Poclain PWe est présenté sur la Figure 55.

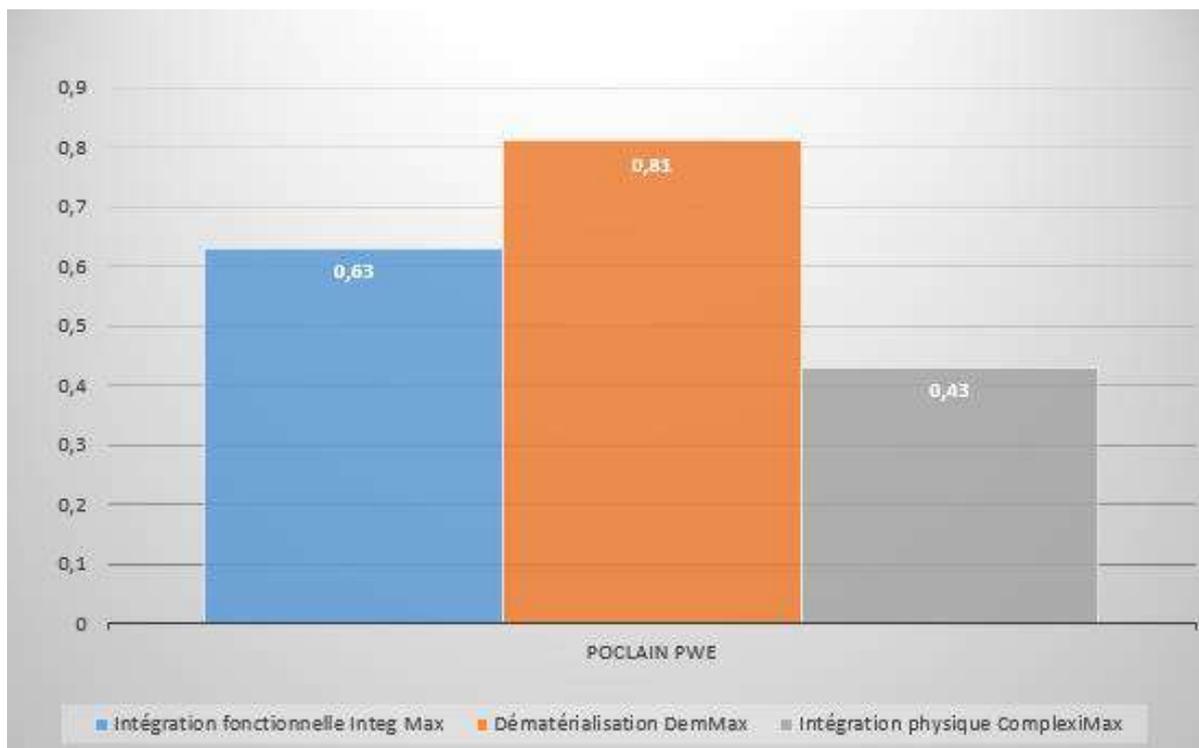


Figure 55 : Degré de mécatronicité de la pompe Poclain PWe

3.5.5. Comparaison entre les deux pompes hydrauliques de Poclain

Sur le graphe présenté sur la Figure 56, il est possible de voir la nette progression des trois indicateurs qui reflètent l'intégration, la dématérialisation et la complexité entre les deux générations des produits PW et PWe.

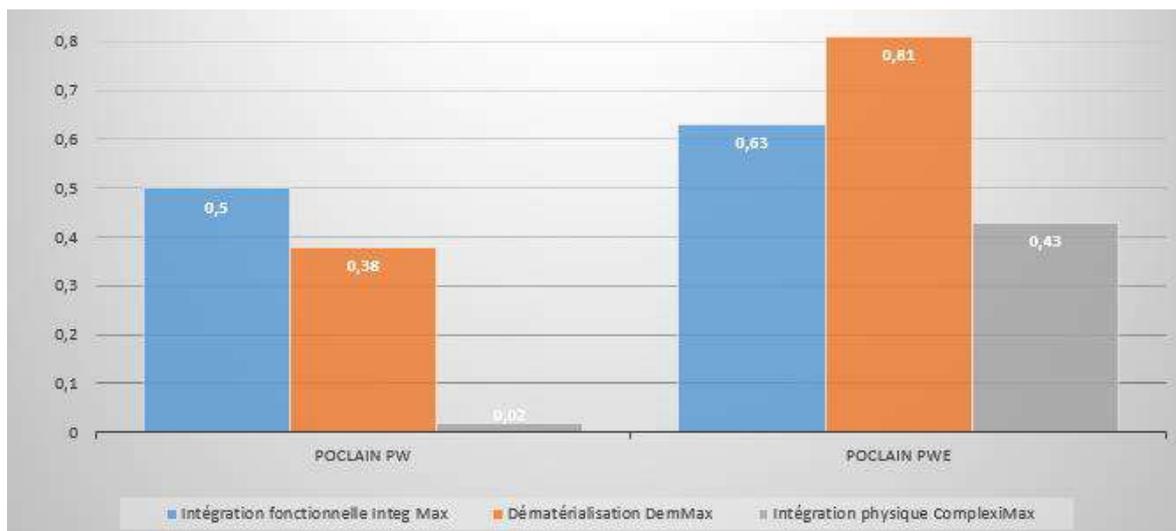


Figure 56 : Evolution de mécatronicité de PW à PWE

Si la pompe PW est uniquement un produit hydraulique et mécanique assorti d'électronique, la pompe PWE devient un produit hautement intégré et complexe. Des fonctions sont réalisées par un ordinateur qui se nourrit des informations produites par l'instrumentation intégrée au produit. Cette progression du degré de mécatronicité offre ensuite les possibilités de commercialisation diversifiée du produit, d'ailleurs repérable dans leur catalogue de vente, ainsi que la possibilité de proposer des services supplémentaires. Il ressort que l'élévation du degré de mécatronicité du produit peut conduire à une évolution du modèle d'affaires de l'entreprise.

3.6. Mise en exergue de l'évolution du degré de mécatronicité des produits

Dans la partie précédente, l'application de trois métriques principales a été proposée : **l'intégration fonctionnelle**, le **degré de dématérialisation** et **l'intégration physique** (complexité fonctionnelle) des produits mécatroniques.

A l'aide de cette méthode, il est possible de comparer les produits de plusieurs générations d'une même entreprise comme visible sur la Figure 56 ou encore entre plusieurs fabricants de mêmes produits et à une moindre mesure, entre produits différents de fabricants différents. Nous constatons, en effet, une évolution de

mécatronicité des produits de 2 fabricants, fournisseurs de deux secteurs différents. Pour le premier, il s'agit des produits LEM, LEMAX et LEMCOM, visibles dans Figure 57, de l'entreprise Coval, spécialiste de la préhension et fournisseur pour les secteurs de packaging, de robotique, de bridages, de transferts, de plasturgie et des lignes de production.



Figure 57 : Les trois génération de pompes à vide LEM, LEMAX et LEMCOM de Coval

Poclain, quant à lui, est fournisseur de secteurs comme le BTP, l'agriculture, la manutention, les secteurs industriel et routier, l'environnement etc. Nous avons étudié l'évolution de mécatronicité de deux produits, la pompe hydraulique PW et la pompe mécatronique PWe, comme visible sur la Figure 58.



Figure 58 : Pompes Poclain : PW hydraulique et PWe mécatronique

Dans les deux cas, on observe une évolution de complexité du produit, due à l'intervention de plusieurs domaines dans la conception et fabrication du produit. Pour Coval ces domaines sont la mécanique, la pneumatique, l'électronique et l'informatique et pour Poclain, la mécanique, l'hydraulique, l'électronique et l'informatique.

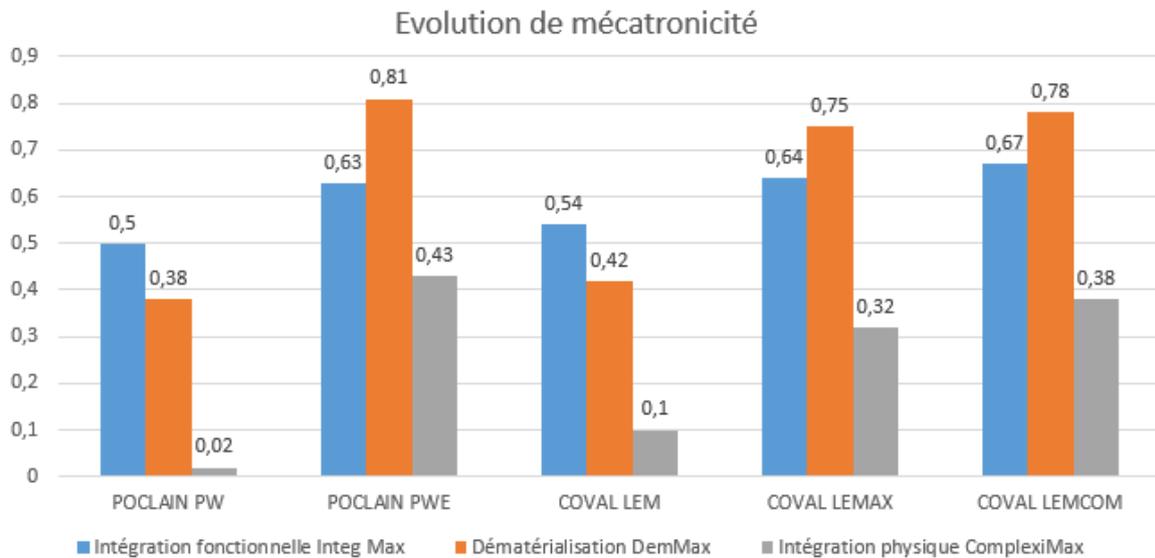


Figure 59 : Evolution de mécatronicité des produits des entreprises Poclain et Coval

Comme visible sur l'histogramme présenté dans la Figure 59, l'évolution la plus notable des produits provient de l'intégration et de la dématérialisation du produit due à la collaboration étroite qu'il y a entre les composants pour la réalisation des fonctions (indicateur) et à l'intervention des domaines de l'électronique, de l'informatique et de l'automatique (indicateur DemMax).

Ces trois métriques proposées permettent donc de déterminer la maturité mécatronique d'un produit. Ce degré de mécatronicité peut ensuite conduire à des changements de modèles d'affaires comme argumenté dans le Chapitre 4 et présenté dans la partie suivante faisant office de lien entre les deux chapitres.

3.7. Le lien entre les fonctions d'un produit et la formulation de l'offre

Dans la partie précédente, l'analyse fonctionnelle et les flux fonctionnels d'un produit mécatronique ont été utilisées dans la définition d'une méthode de calcul de degré de mécatronicité d'un produit. La proposition de développement de métriques dans ce travail est donc relative à l'analyse fonctionnelle du produit où une liste de fonctions de service doit être clairement établie et liée aux flux fonctionnels que l'on doit pouvoir identifier.

Ces fonctions de service, extraites depuis un catalogue d'offre de produits, peuvent être mises en relation avec l'offre qui est formulée à partir de ces dernières comme montré dans le Tableau 54 sur l'exemple des produits Coval, traités au cours de cette thèse. Il s'agit de répondre à une attente globale d'économie d'énergie et d'ergonomie accrue demandée par les clients existants, par exemple, ou encore comme une proposition d'amélioration de produits pour tous les marchés existants dans le sens de concepts expliqués par (Blattberg, Getz, and Thomas 2001) où la fidélisation de clients existants est possible par une proposition de vente additionnelle,²¹ par exemple, le recrutement nouveaux clients est envisageable parce que le produit est facile à installer et modulable, comme dans le cas de Coval ou encore Poclair. Ces améliorations facilitent alors pour le concepteur – fabricant l'accès aux nouveaux marchés.

Les résultats attendus par le client = une base pour la formulation de l'offre	UNE BASE COMMUNE avec améliorations continues	Attentes traduites en fonctions		
		LEM	LEMAX	LEMCOM
F1 Préhension améliorée		F1 Optimiser la saisie des pièces	F1 Optimiser la saisie des pièces	F1 Optimiser la saisie des pièces
F2 Compression améliorée		F2 Optimiser lâcher des pièces	F2 Optimiser lâcher des pièces	F2 Optimiser lâcher des pièces
F3 Communication simple		F3 Communiquer l'état du système à l'utilisateur	F3 Communiquer l'état du système à l'utilisateur	F3 Communiquer l'état du système à l'utilisateur
F4 Silence du fonctionnement		F4 Configurer dynamiquement les paramètres	F4 Configurer dynamiquement les paramètres	F4 Configurer dynamiquement les paramètres
F5 Economie d'énergie		F5 Economiser l'énergie	F5 Gérer intelligemment l'énergie	F5 Gérer intelligemment l'énergie

²¹ Le cas où le produit vendu en plus est un accessoire ou service lié au produit principal acheté.

F6 Mise en œuvre simplifiée		F6 S'intégrer dans le système (se fixer sur le robot)	F6 S'intégrer dans le système (se fixer sur le robot)	F6 S'intégrer dans le système (se fixer sur le robot)
F7 Mise en route, l'exploitation et la maintenance facilitées	DEVELOPPEMENTS LEMAX ET LEMCOM		F7 S'adapter aux pièces étanches et poreuses	F7 S'adapter aux pièces étanches et poreuses
F8 Compacité et modularité (assemblage combinaison en îlot)				F8 Alerte au cas où il y a une défaillance
F9 Communication entre utilisateurs et systèmes et entre systèmes et systèmes				F9 Communiquer l'état du système à son environnement

Tableau 54 : Le lien établi entre la formulation de l'offre à partir des attentes des clients et la traduction de ces attentes en fonctions de service pour les produits de plusieurs générations LEM, LEMAX et LEMCOM de l'entreprise Coval

L'approche présentée dans ce chapitre concerne donc la phase où les fonctions du produit ont déjà été établies en tant que fonctions de service d'un produit et extraites du catalogue du produit. Puisque l'offre de produits fonctionnels mécatroniques commence à être formulée depuis les premières phases de conception voire de préconception, elle concerne les dynamiques d'échanges entre les équipes de conception, production, vente et marketing qui contribuent de façon concourante à la formulation de l'offre tout au long du processus de création et de fabrication du produit.

3.8. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, une définition du module fonctionnel mécatronique qui permet la décomposition objective d'un sous-système mécatronique ou composant mécatronique est donnée. Sept métriques d'intégration fonctionnelle sont proposées dont trois éprouvées sur six produits mécatroniques et en collaboration avec trois

entreprises mécatroniques, membres d'Artema. De plus, un lien entre les fonctions de service et la formulation de l'offre a également été établi et permet de souligner l'importance de la décomposition et l'analyse fonctionnelle des produits mécatroniques.

Une méthode d'application, avec la présentation de l'expérimentation sur deux produits est proposée. L'utilité de cette méthode est triple. Tout d'abord, il s'agit de pouvoir dire si un produit est mécatronique et à quel point afin de permettre à une entreprise PME de déterminer le degré de maturité mécatronique de ses produits. Ce levier qui permet un premier positionnement, permet dans un deuxième temps d'établir le lien entre le degré de mécatronicité du produit et la maturité des processus de l'entreprise, surtout en matière de conception, pour commencer. En effet, une observation s'impose, les étapes clés de la mécatronique peuvent être racontées à l'aide des indicateurs proposés, si l'on observe la Figure 59, mais surtout à l'aide de l'indicateur de dématérialisation DemMax, comme visible dans le Tableau 55.

Classification proposé	I Candidat	II Débutant	III Avancé	IV Confirmé	V Champion
Classification possible par la mesure du degré de dématérialisation DemMax	Proche de 0	Valeurs sous 0,5	Valeurs entre 0,3 et 0,5	Valeurs entre 0,5 et 0,75	Valeurs supérieures à 0,75
Classification par l'intensité de numérisation	Produits mécaniques	Mécanique + Electronique analogique	Mécanique + électronique analogique améliorée	Mécanique + électronique+ logiciel embarqué AB	Mécanique + électronique+ logiciel embarqué ABC
Capacité de communication	Pas de communication	Communication par affichage	Communication par affichage + transmission de données A	Communication par affichage + transmission de données A, B	Communication autonome (réaction de réajustement en fonction de nouvelles données détectées)
Exemples de produits	Mécanique et Mécanique de haute précision	Mécanique (de haute précision) assortie d'électronique	Pompe PW (Poclair) Pompe à vide LEM (Coval)	Pompe à vide LEMAX (Coval) Systèmes automatisés électropneumatiques	Pompe à vide communicante LEMCOM (Coval), Pompe PWe (Poclair)
Type de Bureau d'études	Mécanique	Mécanique faisant appel à l'électronique	Mécanique et électronique analogique	Mécanique et électronique analogique améliorée	Mécanique et électronique embarquée
Métiers au sein du Bureau d'études	Mécaniciens	Mécaniciens	Mécaniciens et Electroniciens	Mécaniciens et Electroniciens automaticiens	Informaticiens programmeurs spécialistes d'électronique embarquée

Tableau 55 : Les étapes clés de la mécatronique montrant l'évolution des produits mécaniques vers des produits de plus en plus intelligents et communicants

En effet, l'indicateur de dématérialisation fonctionnelle DemMax est celui, qui raconte l'histoire de la mécatronique d'une façon particulière. Même si les deux autres indicateurs témoignent des efforts organisationnels au niveau de l'intégration et de la complexité, l'indicateur DemMax reflète le pas à franchir lorsque l'on vise à devenir mécatronique. Pour commencer, il faut déjà avoir un bureau d'études mécanique que l'on fait évoluer aux métiers de l'électronique analogique d'abord. Le pas décisif consiste ensuite à l'élargir aux métiers de l'informatique, par exemple, par l'embauche d'un informaticien programmeur spécialiste d'électronique embarquée.

Dans un troisième temps, enfin, le degré de mécatronicité du produit conditionne et/ou permet la création de services, et implique le changement de modèles d'affaires pour l'entreprise.

A partir de cette méthode, il est possible de poser un standard pour évaluer le degré de mécatronicité de produits des publics diversifiés : novices en mécatronique ainsi qu'entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique. L'outil proposé ici permet notamment à une entreprise qui souhaite se lancer dans la mécatronique d'évaluer de façon assez réaliste les compétences techniques qu'elle doit prévoir pour la réalisation d'un produit mécatronique. A l'entreprise mécatronique déjà confirmée, il permet de se rendre compte du degré de mécatronicité de ses produits actuels et de planifier de futurs développements.

De même, un lien a été établi entre les fonctions remplies par le produit et l'offre formulée sur l'exemple d'un produit de l'entreprise Coval. Les fonctions de service d'un produit peuvent alors être vues comme la capacité du produit à satisfaire une demande.

Ainsi, dans le Chapitre 4 suivant, le concept de modèle économique ou encore de modèle d'affaires est présenté de plus près puisque c'est un outil qui d'une part, permet à l'entreprise de bâtir des plans qui pourront lui faire générer des bénéfices et d'autre part, d'apporter des éléments d'analyse pour sonder la capacité de l'entreprise à savoir vendre ses produits d'une manière nouvelle ou innovante. De plus, l'étude des processus organisationnels nécessaires pour produire et commercialiser des produits mécatroniques est présentée ici pour les cinq entreprises mécatroniques étudiées et sert de base pour la proposition d'un modèle de maturité de processus mécatroniques.

4. Chapitre 4 – Spécificités des processus des entreprises mécatroniques

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a proposé une méthode pour définir le degré de mécatronicité d'un produit à partir de la définition de module fonctionnel mécatronique.

Ce chapitre présente le deuxième outil ou levier qui peut être intégré dans l'outil de pilotage stratégique et opérationnel appelé business motivation model (BMM) pour déterminer les processus qu'il est nécessaire de maîtriser pour la réalisation de produits mécatroniques. Autrement dit, il s'agit de répondre à la question de « comment » s'organiser et « où » agir pour arriver au résultat visé comme montré sur la Figure 60. Ensuite, il convient de proposer un modèle de maturité pour évaluer le niveau atteint de ces processus.

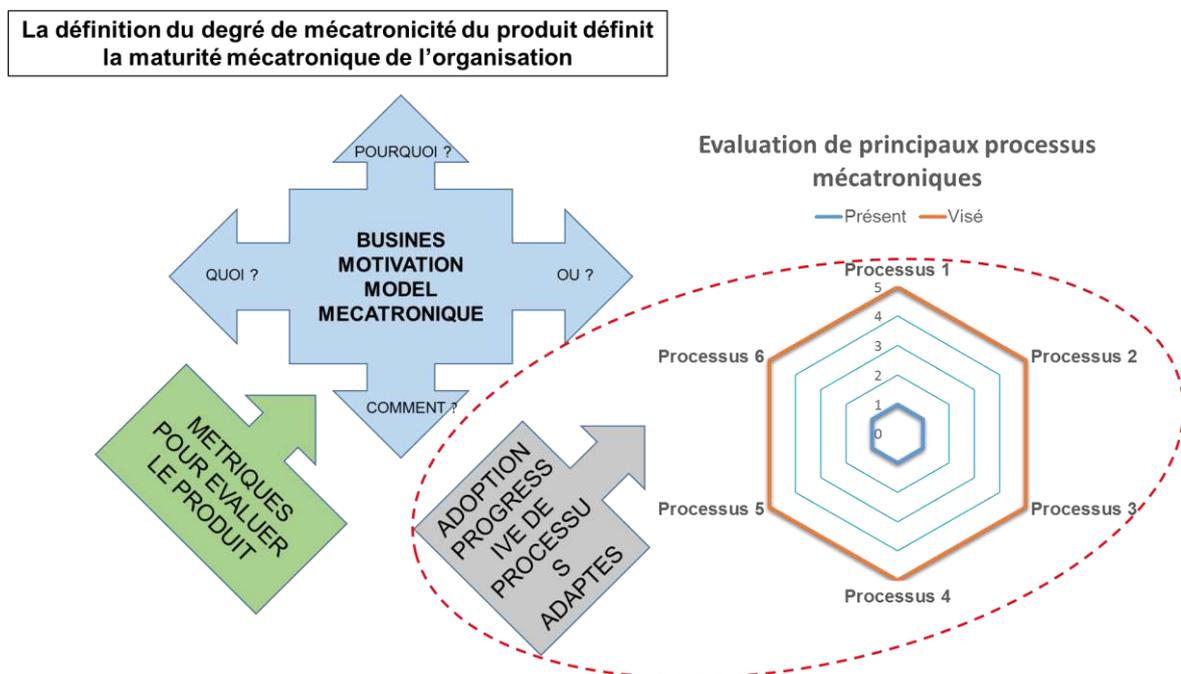


Figure 60 : La définition du deuxième outil, un modèle de maturité pour définir la maturité mécatronique d'une entreprise afin de lui permettre la planification et l'adoption progressive de processus adaptés à la mécatronique

Cette 4^{ème} partie du mémoire restitue donc les résultats de l'étude dont l'objectif est de proposer les outils pour déterminer le niveau de performance dans la pratique mécatronique. Pour rappel, on est parti du principe que la maturité d'une entreprise engagée dans la production de produits mécatroniques est corollaire de la qualité du produit qu'elle fabrique. L'objectif ici est d'établir une corrélation entre le degré de mécatronicité du produit et celui des processus organisationnels adaptés à la mécatronique moyennant une méthode de calcul du degré de maturité mécatronique. Cette corrélation se fait donc à l'aide du deuxième outil qui permet d'effectuer un état de lieux au niveau des processus et de les comparer à un état d'évolution souhaitée.

Le chapitre est construit comme suit : nous présentons tout d'abord le concept de validité pragmatique pris en compte pour les 5 entreprises étudiées et restituons synthétiquement les contenus des entretiens relatifs aux processus mécatroniques spécifiques à partir de ces cinq études de cas. Ensuite, les concepts nouvellement introduits ou élargis sont présentés et notamment les systèmes de production orientés services (Product Systems and Services et Service Oriented Architectures) et le modèle économique ou d'affaires. Cela nous permet d'expliquer pourquoi les produits mécatroniques permettent ou poussent ces entreprises à changer de modèles d'affaires. Enfin, l'outil ou le modèle pour le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique est présenté : il permet de constater le niveau des processus mécatroniques existants de l'entreprise et de les comparer à un état d'évolution de processus mécatroniques souhaité.

4.2. Le concept de validité pragmatique

La validité pragmatique est selon (Miles and Huberman 2013) un complément essentiel à la recherche qualitative. C'est pourquoi, même si les résultats proposés jusqu'à présent sont valides et transférables, des questions éthiques du type « A qui l'étude qualitative profite-t-elle et peut-elle nuire ? » et « Quel est son intérêt à l'usage managérial ? » doivent être posées à ce stade de la restitution de l'étude.

Pour satisfaire à ce concept, les contenus précis des entretiens et les documents spécifiques que les entreprises ont bien voulu nous confier, doivent rester confidentiels et nous présentons ici seulement le guide d'entretien semi-directif qui a servi d'appui

pour les entretiens. Il peut se résumer en 8 questions principales et quelques sous-questions (Tableau 56).

Questions relatives au produit, à la conception et en lien avec le reste de l'organisation	
Question 1	Pouvez-vous nous montrer une architecture produit avec sa nomenclature dans le « PLM » ou autre ?
Question 2	Quel est votre modèle de conception ?
Sous-question 2.1	Quels sont vos outils multi-physiques ?
Sous-question 2.2	Quels sont vos tests ?
Question 3	Quels sont vos processus spécifiques ?
Sous-question 3.1	Quels sont vos flux de travail avec les clients ou utilisateurs ?
Question 4	Que mesurez-vous et comment ?
Sous-question 4.1	Quels indicateurs sont les plus pertinents pour vous ?
Questions relatives à la feuille de route stratégique utilisée par ces entreprises	
Question 1	Quelles étaient les étapes les plus critiques à franchir pour faire de la mécatronique ?
Question 2	Pour ces étapes, pouvez-vous nous détailler et dire comment vous avez bravé les difficultés ?
Question 3	De quelles optimisations au niveau organisationnel faut-il tenir compte dès le départ ?
Question 4	En résumé, quel conseil donneriez-vous aux entreprises qui se lancent dans la mécatronique ?

Tableau 56 : Le questionnaire semi-directif utilisé lors des entretiens

4.3. Restitution synthétique des contenus des entretiens relatifs aux processus mécatroniques spécifiques à partir de ces cinq études de cas

Les 5 entreprises consultées, Bosch Rexroth, Coval, Pack'Aéro, Poclain Hydraulics et NTN-SNR, membres d'Artema nous ont accordé des entretiens, certaines d'entre elles plusieurs fois et ne souhaitent pas que les contenus des entretiens, enregistrés et gardés au sein du SYMME, soient divulgués. Deux autres entreprises, n'appartenant pas au syndicat de la mécatronique, Schneider Electric et Edel Tamp ont également été consultées et les résultats des entretiens avec ces dernières convergent avec ceux des cinq études de cas.

Les entretiens ont été dépouillés par trois chercheurs et les résultats validés par l'ensemble des entreprises et le comité mécatronique présenté dans la première partie du mémoire. Ces entretiens, reposant également sur la documentation que les entreprises nous ont confiée, nous ont permis d'approfondir nos connaissances au sujet des processus spécifiquement mécatroniques. Ils sont présentés dans la partie suivante.

4.4. Les processus pour réussir dans le domaine de la mécatronique

La restitution est donnée par les thèmes suivants abordés avec les entreprises : la conception mécatronique avec leurs méthodes de travail et la prise en compte de contraintes en phase de conception avec les processus d'intégration des fournisseurs, leur forte implication dans les réseaux mécatroniques est montrée et leur approche des marchés, leurs équipements productifs et la qualification des fournisseurs, la gestion des RH et de connaissances ainsi que leurs pratiques d'innovation ouverte sont résumés. Enfin, la mécatronique les pousse ou leur permet également de modifier leurs modèles d'affaires. Quelques illustrations relevées sur le terrain sont données, sans toutefois les attribuer nominativement, mis à part lorsque ces données sont

également repérables sur leur site internet ou disponibles à travers leurs catalogues de vente.

4.4.1. La conception mécatronique

L'histoire de la mécatronique, dans ces entreprises, débute par la conception de systèmes multi-physiques qui constitue donc un premier pas vers la mécatronique. Dans les entreprises étudiées, la maturité mécatronique est grande mais a commencé, il y a plusieurs décennies déjà pour certaines, par la création d'un bureau d'études pour étudier les systèmes mécaniques combinés avec de l'électronique analogique d'abord pour rendre les produits plus fonctionnels et a évolué ensuite vers l'électronique embarquée et la numérisation progressive de produits.

Les méthodes de travail adoptées pour les systèmes multi-physiques en conception sont agiles afin de garantir un retour rapide vers le client, essentiel. Cela peut s'effectuer par du prototypage rapide sous forme de maquette en papier, numérique ou encore physique. Ainsi, le cycle de développement adopté est de préférence en V comme montré sur Figure 61 ou s'oriente vers des cycles de conception très proches de méthodes agiles, comme SCRUM, utilisée en développement de logiciels, par exemple.

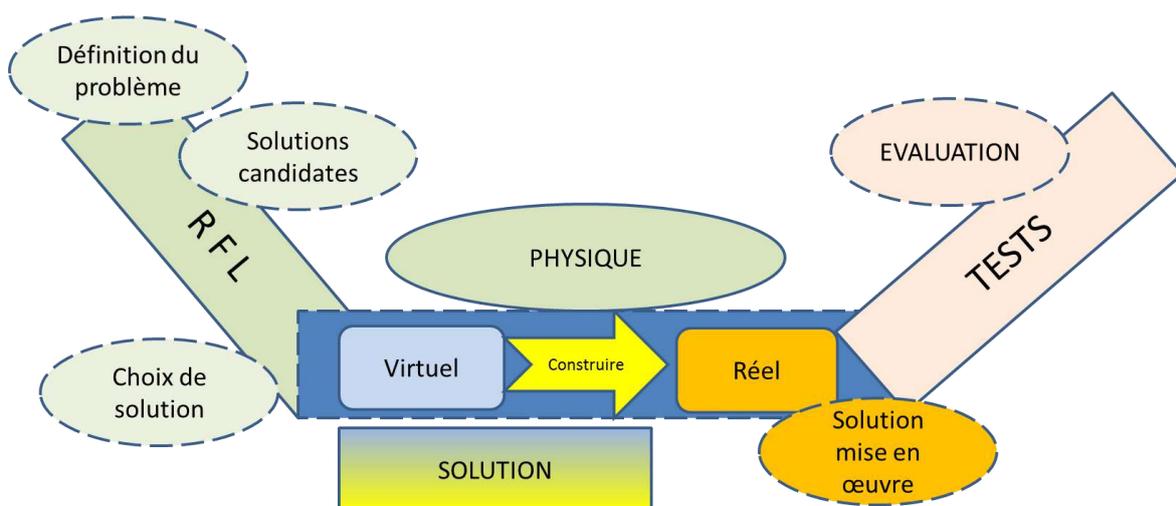


Figure 61 : Zoom sur la méthode en V inspirée de : F Dassault qui traduit bien la notion « Requirement Functional Logical Physical » ou le passage allant du virtuel au réel et peut être associé également à la matérialisation des contraintes à partir du cahier de

L'unité de conception s'interface fortement avec le reste de l'organisation de façon organique. Cela se traduit par un fonctionnement par projet. Les unités qui participent au projet sont : la production et la logistique, la conception, la qualité et les approvisionnements, le bureau d'études, la vente et le marketing. Chaque projet est constitué de membres issus de ces services et se voit attribuer un chef de projet.

Un projet mécatronique peut, d'une façon généraliste, être divisé en ces 5 phases de maturité : (1) la phase d'évaluation (faite entre le marketing et les autres acteurs du projet), (2) la phase de faisabilité dont l'outil sont des maquettes ou « mock-up » pour un retour sur l'idée de départ, (3) la phase de prototype - définition de produit et de processus, (4) la phase de pré-séries pour la validation de produits et de processus et (5) la phase de lancement de séries.

Etant donné la complexité des produits, c'est-à-dire la nécessité de nombreuses interactions pour effectuer les couplages entre les composants de différents domaines, il est nécessaire de développer un savoir-faire important en qualification de contraintes dues aux systèmes (méthodes), comme par exemple, la prise en compte des contraintes thermiques liées à la forte intégration des produits mécatroniques (la dissipation de chaleur dans les systèmes fortement intégrés, par exemple), la gestion d'énergie pour une optimisation de la consommation, la communication pour la gestion des infrastructures de réseaux de stockage et la gestion des données pour l'exploitation de grandes quantités de données fournies par les systèmes mécatroniques installés.

La maîtrise de fiabilité est donc indispensable. Il y a notamment des modes de fonctionnement dégradés à prévoir afin de minimiser les pannes. En ce sens, certaines entreprises recourent également à la surqualité pour parer aux défaillances.

4.4.2. Les réseaux mécatroniques

Leur implication dans les réseaux professionnels est grande, nous les avons d'ailleurs pu contacter par le biais du syndicat de la mécatronique Artema. Par ailleurs, ces

entreprises font partie de plusieurs réseaux professionnels, ce qui leur permet de rencontrer des spécialistes de différents domaines nécessaires à la conception et production mécatroniques. Elles s'en servent également pour faire connaître leurs projets et progrès et s'impliquent également beaucoup pour faire développer un label de la mécatronique destiné à faire évoluer la sous-traitance mécanique vers la mécatronique. Elles affichent ainsi une attitude proactive et ne se contentent pas de visiter quelques salons et de participer à quelques colloques par an. Ces entreprises embauchent également des stagiaires d'écoles d'ingénieurs sur une base régulière, des docteurs et collaborent avec des laboratoires universitaires pour faire développer leurs produits. Elles n'hésitent pas de faire appel à la consultance et participent à l'élaboration de programmes de formation pour les besoins de compétences futures qu'ils savent prévoir.

4.4.3. L'approche des marchés et clients mécatroniques

Il a été observé, dès le départ, que les entreprises du panel initial généraient des chiffres d'affaires importants, comme montré dans le Tableau 31. Après notre enquête, il s'avère que les produits mécatroniques contribuent effectivement à des marges importantes et des croissances du chiffre d'affaires à deux chiffres.

Les organisations mécatroniques consultées ont un ratio CA/Taille élevé. La valeur ajoutée de nouveaux produits mécatroniques s'élève de 40 à 60 %.

L'apport fonctionnel au produit demande de repenser la façon dont il sera vendu, les marges à envisager et implique toute la chaîne de commercialisation : de l'approvisionnement à la vente et au-delà, jusqu'au démantèlement du produit. Il y a un véritable changement dans le montage des affaires : on passe **du coût de revient à une valeur d'usage**. La compétence organisationnelle pour appréhender les différents coûts est la comptabilité analytique, ce qui se traduit également par le pilotage par les coûts ». Ainsi, se munir des capacités à satisfaire les clients et les marchés devient indispensable.

4.4.4. Les équipements productifs et la qualification des fournisseurs

Ces entreprises disposent d'équipements productifs modernes que sont les machines à faible coût de changement qualifiées de souples. Cela permet à l'entreprise de lancer de petites séries. Elles utilisent également des outils de suivi et de gestion de données issues de fabrication comme le Product Data Management et d'autres outils de gestion de cycle de vie ou PLM.

Leur processus de qualité prévoit aussi une qualification de fournisseurs spécifique et s'échelonne selon ces 3 catégories : la première catégorie représente les fournisseurs connus qui ont déjà les processus de développement de produits ou de parties de produits compatibles avec l'entreprise, la deuxième catégorie représente les fournisseurs qui sont encore à surveiller et la troisième catégorie est réservée aux fournisseurs qui sont en train de mettre en place des processus compatibles avec l'entreprise. Autrement dit : elles ont une stratégie d'intégration de fournisseurs très élaborée dans le processus de développement de produits : 1) produit étagère ne nécessitant aucune modification 2) nouvelle création pour le compte de l'entreprise nécessitant le développement de processus chez le fournisseur. Ce processus d'intégration de fournisseurs hautement spécifié requiert une extrême coordination, une collaboration, une souplesse et une adaptation de toutes les parties prenantes.

4.4.5. La gestion des RH et des connaissances

Le développement de produits mécatroniques passe également par la gestion de nouvelles compétences métier qu'il faut prévoir et incorporer à l'entreprise. Un exemple de compétences auxquelles ces entreprises ont fait appel : électronicien pour commencer et ensuite, informaticien programmeur, architecte produit, mécatronicien. Elles organisent également des formations pour sensibiliser ces différents spécialistes aux contraintes issues des méthodes de travail des uns et des autres. Les formations sont soit des formations de sensibilisation ou systématiques sous forme de formations continues pour les entreprises les plus évoluées.

Dans le cadre de cette étude, l'évolution des produits mécatroniques commence par l'intégration dans l'entreprise mécanique, au départ, des électroniciens spécialistes de l'électronique analogique, ce qui donne des produits intelligents de première génération, toutefois faiblement communicants et donc de faible degré de mécatronicité, comme montré sur l'exemple des produits de Poclair et de Coval de première génération, la pompe PW et LEM (Figure 59). Pour les produits de Coval, on peut observer une nette progression de l'indicateur de dématérialisation entre les pompes à vide Lem, et Lemcom. Cette dématérialisation a été possible grâce à l'embauche d'un informaticien programmeur, spécialiste des logiciels embarqués. La conséquence au niveau organisationnel a été d'envergure ; les routages à effectuer sur les cartes électroniques afin que le produit système communique avec d'autres systèmes comme l'Ethernet en l'occurrence, ont représenté un grand pas en avant pour l'entreprise en termes de compétences. Cette évolution d'un bureau d'études en électronique analogique à l'électronique embarquée ou numérique, donc multidisciplinaire, a provoqué ensuite toutes les occurrences relatées plus haut, à savoir, le besoin d'interfacer la conception avec le reste de l'entreprise, les clients et les fournisseurs et surtout de former les forces d'achat et de vente aux nouvelles techniques de vente d'un produit fonctionnel offrant des services.

Au niveau de la gestion des connaissances, enfin, la stratégie globale que ces entreprises poursuivent est celle de permettre de nouveaux apprentissages en incorporant de nouvelles connaissances métier et de rendre ces connaissances disponibles et réutilisables a posteriori. Pour cela, elles se servent d'outils de gestion de connaissances qui permettent la création d'artefacts à l'aide des outils de PLM ou de langages de modélisation SysML par exemple. Ce qui fait également augmenter le savoir-faire de l'entreprise et la distingue des autres en matière de gestion de connaissances (elles génèrent de la documentation ou artefacts pour une traçabilité et réutilisation de données).

4.4.6. L'innovation ouverte

Afin d'apporter des solutions à leurs clients, d'élargir la gamme de leurs produits ou encore de s'ouvrir à de nouveaux marchés, ces entreprises innovent de différentes façons. Nous avons identifié, outre les processus d'innovation classiques (R&D de

produits), deux formes d'innovation ouverte. Ces deux formes d'innovation répondent à ces deux définitions : 1) en co-développement de solutions avec les clients ou fournisseurs et 2) en co-développement avec les usagers. Une troisième forme serait celle de développements autonomes de certains usagers intégrés au système développé. Cependant aucune des 5 entreprises consultées n'a recours à cette troisième forme d'innovation ouverte pour l'instant (logiciel ou plateforme logicielle en ligne par exemple).

Les interactions avec les clients sont donc fortes et multiples afin d'avoir la validation rapide des produits en développement. Les méthodes d'échanges avec les clients s'inspirent fortement des méthodes de créativité en management de l'innovation ou agiles. Elles ressemblent en cela à des fablab ou living lab. Pour les nouveaux produits, ils ont des clients early adopters qui leur servent de lanceurs, testeurs et disséminateurs de nouveaux produits. Ces entreprises savent tirer parti des techniques utilisées en management d'innovation : elles conçoivent et distribuent des prospectus avec l'idée de leurs produits aux clients. Ces derniers sont priés à y déposer leurs notes et réactions. Leurs annotations sont ensuite récupérées et servent au développement de nouveaux produits et services. Elles peuvent également faire circuler des maquettes entre tous les acteurs dans la phase de faisabilité. Les prototypes sont présentés à des clients potentiels et prospects et les documents de vente sont faits et diffusés dans la phase de lancement de préséries.

4.5. Synthèse des entretiens

La mise en place de tous ces processus entraîne des répercussions certaines en conception, influe sur la vente et modifie la relation avec les clients. Les répercussions sont d'ordre organisationnel et managérial, touchent au management des risques et au management des ressources humaines. Enfin, l'organisation entière est concernée.

Par exemple, si le système mécatronique peut donner un retour d'informations sur son propre fonctionnement, les opérations de maintenance peuvent être prévues plus facilement. Le service de maintenance classique peut être élargi ou remplacé par un nouveau service désormais plus fonctionnel.

Concrètement, au niveau des produits, ces entreprises développent des programmes informatiques (protocoles) qui sont dimensionnés pour de futurs développements des produits, notamment pour une mise en réseau des systèmes, comme cela a été illustré sur la pompe mécatronique PWe de Poclair. Ces exigences particulières nécessitent la mise en place des processus de fiabilité poussés et de qualifications de fournisseurs importantes. En sortie, cela permet d'offrir aux clients de nouveaux services et notamment différents suivis et mises en relation dans le cas de maintenance prédictive, par exemple, ainsi que des couplages systémiques lorsque les produits peuvent communiquer entre eux ou avec des systèmes de plus grande envergure comme l'Ethernet dans le cas de la pompe à vide LEMCOM de Coval, les systèmes de maintenance prédictive par l'exploitation de données²² où la communication entre les systèmes mécatroniques permet d'adapter des comportements par l'analyse globale de l'ensemble des données.

Au niveau des fournisseurs, les exigences pour leur qualification vont jusqu'à leur demander de qualifier leurs services des achats, les donneurs d'ordre leur font passer des audits minutieux et exigent en premier lieu des tests renforcés de fiabilité et de qualité pour leurs produits considérés comme entrants ou constituants, ou demandent, par exemple, que leurs monteurs soient spécialisés afin de pourvoir sans encombre à la qualité demandée par les clients finaux.

Elles accordent une attention accrue au marketing de vente. En effet, ces entreprises passent de la vente de productivité pure (dite aussi à volume) à la vente de valeur ajoutée fonctionnelle. Cela revient à mettre en avant la valeur du produit dans le contexte de son usage. Par exemple, en mettant en avant le confort qu'il procure : produit devenu moins bruyant, précision de mesure ou de manipulation qu'il permet d'effectuer désormais, produit qui demande moins d'entretien ou entretien inclus dans la garantie. On peut résumer en disant qu'elles savent vendre un produit qui devient cher. Elles organisent, à cet effet, des formations dédiées aux acheteurs et vendeurs pour leur apprendre, d'une part, à qualifier leurs clients en cernant bien leurs besoins et, d'autre part, à développer des arguments de vente pour ces produits mécatroniques assortis de services. Il n'est pas rare que les études de développement soient payées

²² L'entreprise Adixen par exemple

par les clients sous forme de contrat de prestation ou que les fournisseurs participent aux frais de développement de nouveaux produits. D'une façon générale, le client est au cœur du système. Cela peut être résumé schématiquement comme montré sur la Figure 62.

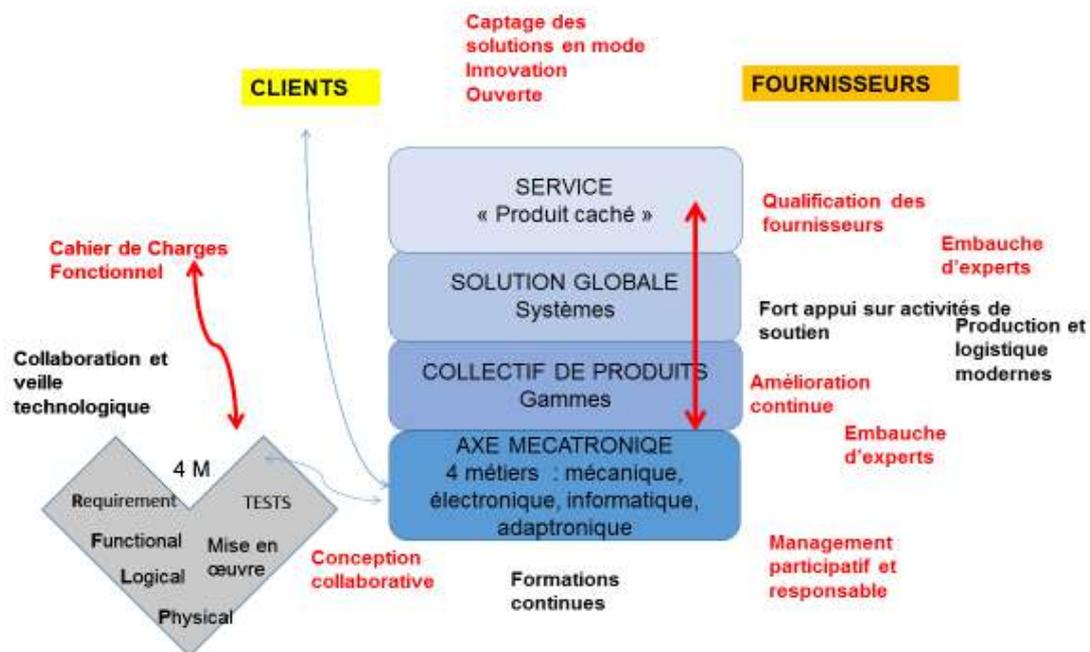


Figure 62 : On peut observer que le degré de mécatronicité du produit permet la création de gammes, des solutions de systèmes globales et enfin de services avec la possibilité d'aller vers les services globaux où le produit devient « caché » (maison et ville connectées, par exemple).

Au niveau de la conception et de la production, le pré-développement de produits peut être résumé par ces étapes clés : (1) cadrage du projet, (2) bouclage avec tous les services concernés, (3) choix de solution, (4) pré-étude et (5) pré-développement du produit ou de la gamme de produits.

Le passage d'un fonctionnement en silo à un fonctionnement en plateau pour ces entreprises est déjà acquis, ou en cours. Le pilotage de projet s'avère nécessaire et requiert des acteurs sachant jouer des complémentarités internes et externes : par exemple en interne, faire intégrer fortement les services de marketing et en externe, faire appel aux électroniciens pour l'entreprise mécanique et vice versa. L'évolution vers la mécatronique dans ces entreprises s'est faite progressivement. Il doit être souligné que ces entreprises sont devenues tout d'abord des spécialistes dans leurs domaines respectifs et qu'elles ont évolué en adoptant de nouvelles technologies par

l'intégration des spécialistes du domaine du numérique et ont intégré de nouvelles pratiques organisationnelles.

Une étape importante dans leur évolution marque la création d'un bureau d'études multidisciplinaire qu'elles ont su faire évoluer de l'électronique analogique à l'informatique, allant, pour certaines, jusqu'à l'exploitation de données, récupérables par le biais de produits mécatroniques, ce qui permet encore d'autres développements de prestation de services. Tel est le cas de Bosch Rexroth avec la création du cloud communiqué ouvertement sur son site internet mais également de l'entreprise Somfy.

Toutefois, il convient de s'intéresser plus particulièrement au cas de l'entreprise NTN-SNR qui présente une modalité à part dans cette évolution vers la dématérialisation. En effet, si Bosch Rexroth, Coval, Pack'Aéro et Poclain ont fait évoluer leurs produits depuis les composants vers des systèmes de pilotage, NTN-SNR, avec le roulement instrumenté a choisi une autre voie d'évolution. Il est certes passé d'un assemblage de produit simple à l'assemblage de produit instrumenté mais rentre, pour nous, dans la catégorie des éléments de liaison, alors que l'on peut considérer les produits des autres entreprises comme des convertisseurs.

Cette synthèse d'entretiens ainsi que les données présentées auparavant nous servent d'appui pour la constitution d'indicateurs de compétences discriminantes pour la construction du modèle de maturité mécatronique qui est présenté à la fin de ce chapitre.

Ci-après, on aborde quelques concepts qui n'ont pas encore été présentés et ceux qui ont seulement été introduits, mais non approfondis, et cependant nécessaires pour expliquer le phénomène étudié dans ce chapitre

Comme vu dans la restitution des entretiens ci-haut et précédemment dans le modèle de recherche proposé (voir Figure 25), ces organisations ont un système de production assorti de services²³. Par exemple, ils accompagnent leurs clients étape par étape dans leurs projets et forment et conseillent les utilisateurs sur site pour mieux utiliser les applications de vide (Coval), proposent des applications mobiles ou une

²³ PSS : Production Systems and Services.

intervention rapide pour éviter toute rupture de chaîne de production (Bosch Rexroth). Une réorientation d'architecture d'entreprise traditionnelle vers une architecture à orientation services²⁴ doit être envisagée pour toute entreprise qui souhaite se lancer dans la mécatronique. Enfin, le business motivation model (BMM¹⁹) qui est un outil managérial pratique pour faciliter cette transition (Berkem 2008) a été déjà introduit en fin de deuxième chapitre.

Pour commencer, la définition de modèle économique ou de modèle d'affaires est donnée ci-après.

4.6. Le changement de modèles d'affaires et les concepts sous-jacents

4.6.1. Le concept de modèle économique

Le « business model » ou modèle¹³ économique est un modèle qui décrit le mécanisme de génération de revenus et permet à une entreprise d'organiser ses activités pour gagner de l'argent (Osterwalder 2004). Les points à prendre en compte sont schématiquement présentés sur la Figure 63. Cette représentation est généraliste et s'adapte à n'importe quelle entreprise.

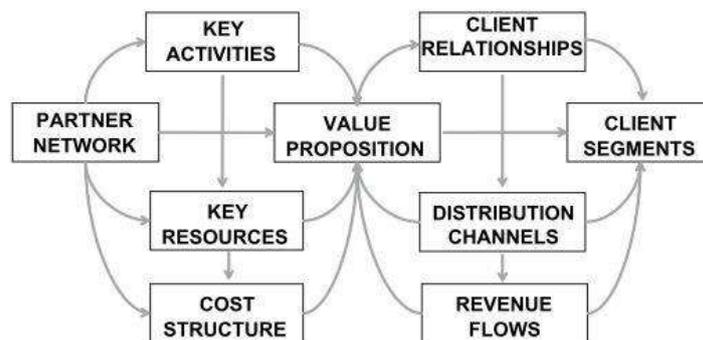


Figure 63 : La décomposition d'un modèle d'affaires en 9 points par (Osterwalder 2004) Source : <http://businessmodelalchemist.com/blog/2005/11/what-is-business-model.html>

²⁴ SOA : Service Oriented Architecture.

Nous faisons également appel à la proposition de principaux attributs de modèles d'affaires (Chesbrough 2003). Ces attributs ou règles de base pour l'élaboration d'un modèle d'affaires ou business plan, adapté à l'innovation ouverte, sont montrées dans les Tableau 57 et Tableau 58 et le fruit de la recherche menée par (Chesbrough 2010) sur les 35 unités R&D de l'entreprise Xerox dans les années 1980. Chesbrough appréhende la phase de l'articulation de la valeur ajoutée en tant que formulation d'actions nécessaires pour définir une stratégie de profit. Afin d'y arriver, il commence par l'analyse de ressources et compétences qu'il détaille en principales actions à mener comme visible dans le Tableau 57.

ANALYSE DU POSITIONNEMENT	ARTICULATION DE LA VALEUR AJOUTEE : actions à mener pour formuler une stratégie de profit
Valeurs	Identification des clients, des volumes, des moyens de distribution
Buts	Validation des raisons d'utilité de la technologie
Aspirations	Détermination du choix des compétences/ressources à maintenir/abandonner/parfaire/réaffecter/développer/acquérir/louer ou sous-traiter
Compétences de base	Définir la structure des coûts
Sélection des produits et des services	Définir les gains et la politique des prix
Quel mix aboutit à une VA ?	Décrire la position à l'intérieur du réseau de la « Chaîne de valeur » (voir Figure 14)

Tableau 57 : Les indicateurs à définir et à prendre en compte pour l'articulation du modèle d'affaires d'après (Chesbrough and Rosenbloom 2002) et (Chesbrough 2010)

L'élaboration de l'offre dépend également et surtout en grandes lignes du positionnement stratégique que nous avons, ici, mis en lien avec les 8 types de buts stratégiques poursuivis et relatifs à la typologie de Mintzberg détaillé auparavant dans le Chapitre 2.

ELABORATION DE L'OFFRE SUIVANT CES 6 BUTS STRATEGIQUES POURSUIVIS	TYPES D'ENTREPRISES CORRESPONDANTES (voir Figure 16)
Accent sur volume de produits	1 Entrepreneuriale ou simple et 2 Production manufacturière
Accent sur volume et diversité de produits	2 Production manufacturière et 4 Divisionnelle
Accent sur la qualité de produits	3 Professionnelle administrative
Accent sur l'innovation en produits et processus et la flexibilité	5 Innovante et 8 Moderne et flexible
Accents sur les optimisations : réduction permanente des coûts à volume de produits constant	2 Production manufacturière et 4 Divisionnelle peut être aussi la 6 Missionnaire
Accent mis sur la diversité et flexibilité	4 Divisionnelle et 8 Moderne et flexible

Tableau 58 : L'offre s'articule en fonction de ces 6 buts stratégiques poursuivis (Chesbrough and Rosenbloom 2002) et peut être mise en relation avec la typologie de (Mintzberg 1980)

L'offre, donc, peut et doit varier selon l'auteur du concept de l'innovation ouverte (Chesbrough 2010). Sans aller aussi loin que lui, prétendant qu' « *une technologie médiocre à l'intérieur d'un bon modèle d'affaires peut être plus profitable qu'une excellente technologie proposée par le biais d'un modèle d'affaires médiocre*²⁵ », nous soulignons cependant son importance et préconisons l'adoption d'un modèle d'affaires informatisé et donc facilement modifiable et pouvant être rapidement déployé à toutes les unités de l'organisation concernées par l'exploitation d'un produit mécatronique. Les propositions de Osterwalder et de Chesbrough sont synthétiquement représentées sur la Figure 64.

²⁵ "A mediocre technology pursued within a great business model may be more valuable than a great technology exploited via a mediocre business model".

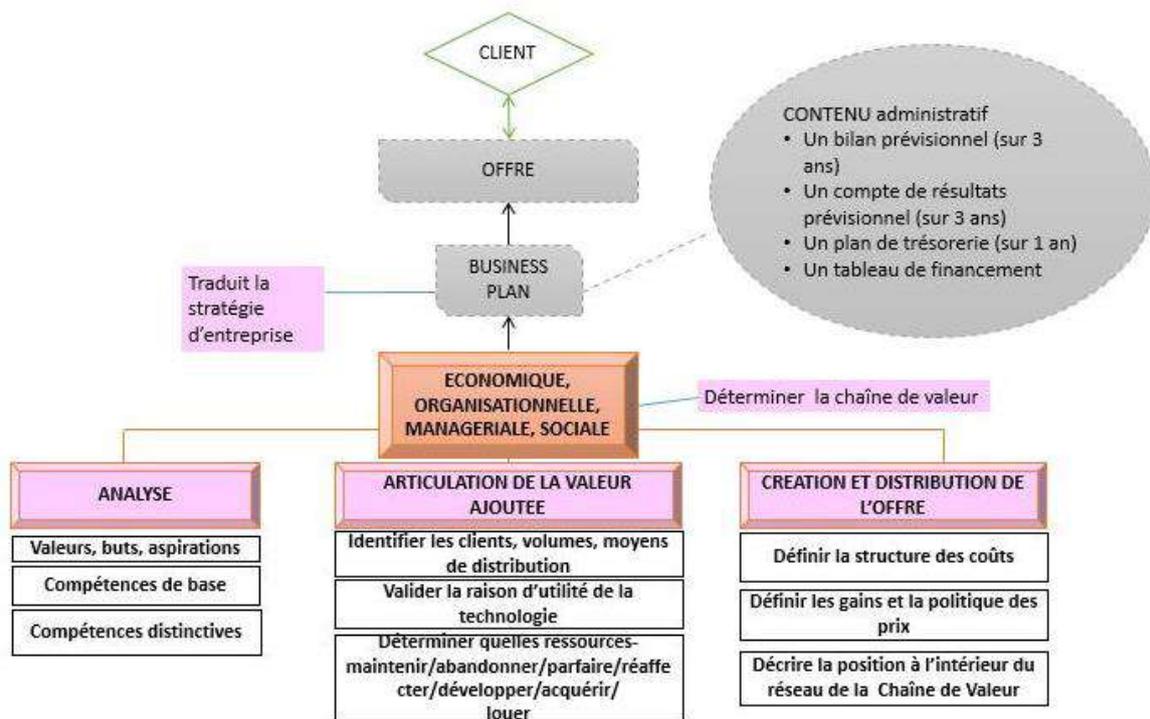


Figure 64 : Ici, la représentation synthétique des propositions de Osterwalder et de Chesbrough pour un modèle d'affaires adapté à la mécanique : l'entreprise doit savoir déterminer sa chaîne de valeur et rentrer les résultats dans l'outil informatisé BMM

4.6.2. Le concept de servicisation

Le produit mécanique permet donc la mise en place des services (voir Tableau 28). Une représentation similaire est donnée également par (Baines et al. 2009) et (Mahut et al. 2015). En tout état de cause, il est étudié depuis les années 1990 (Oliva and Kallenberg 2003) et présente, d'après (Tukker 2004), ces trois catégories principales : (1) les services orientés produits, (2) les services orientés usage et (3) services orientés résultats avec 8 sous-catégories correspondantes, comme cela est visible sur la Figure 65.

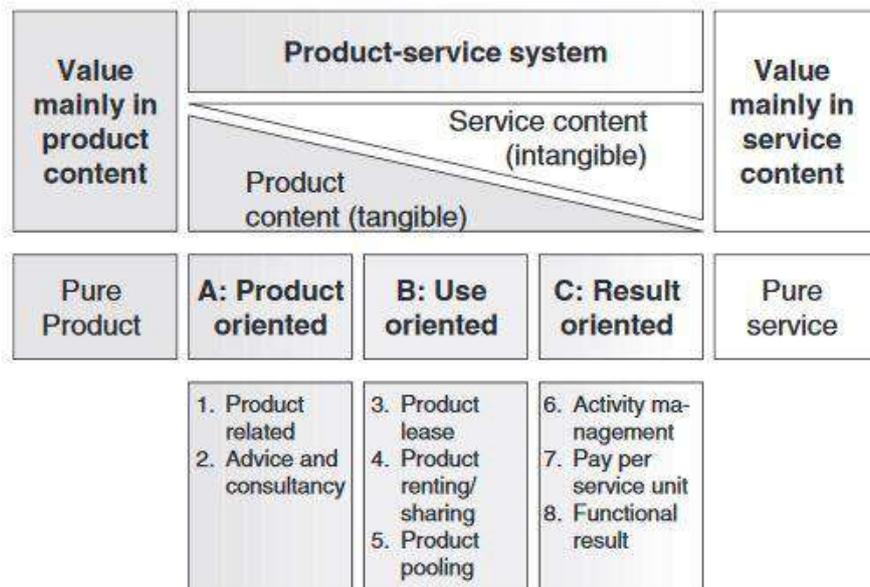


Figure 65 : Evolution de systèmes de production et de services (PSS) : 3 catégories principales avec 8 sous-catégories (Tukker 2004)

Dans le Tableau 59, ce concept est adapté à notre cas : les activités relevées sur les sites des entreprises du panel premièrement étudié sont échelonnées dans une logique de maturité croissante.

Note globale	0 à 3	4 à 7	8 à 11	12 à 16	17 et +
Classification par intensité de services (O&K, 2003)	Consolidation de services relatifs aux produits (garantie produit)	Prestation de services après vente telle réparations et maintenance (prise en charge sur site du client)	Offre de services personnalisée (prestation relationnelle interactive) Maintenance prédictive (dans le produit)	Services relatifs aux processus (consultance, formations payantes)	Prise en charge des opérations du client (le produit devient caché)
Maturité	I Faible	II Moyen	III Croissant	IV Elevé	V Très élevé

Tableau 59 : L'intensité de servicisation premièrement observée mise en relation avec la maturité des entreprise

Pour une revue de littérature sur les systèmes de production assortis de services ou PSS, se référer à (Mahut et al. 2015) et les travaux de thèse de (Bricogne 2014), par exemple.

4.6.3. *Les produits mécatroniques permettent la modification de modèles d'affaires*

D'après l'étude menée dans les 5 entreprises pilotes, les modèles d'affaires de ces dernières peuvent évoluer rapidement, notamment, la vente de produits peut être assortie de services basiques comme le service d'après-vente classique et évoluer à la maintenance prédictive grâce à la mécatronisation du produit pour commencer et jusqu'à s'effectuer par la vente de licences sur des plateformes ouvertes tout en passant par la consultance, formations payantes.

Concrètement, la mécatronique permet à ces entreprises de fidéliser les clients par une vente dite additionnelle d'abord, avant d'élargir leurs gammes de produits et d'accéder à de nouveaux marchés. La fidélisation des clients se fait par l'apport des solutions à leurs problématiques réelles, ce qui renforce le lien qu'ils entretiennent avec leurs clients. A partir du catalogue de vente de Poclain, par exemple, on peut déceler que l'entreprise mène une politique de push. Autrement dit, le développement logiciel du produit lui permet d'élargir le degré de services amenés par le produit où le protocole logiciel est prévu pour de futurs développements. Exemple : la pompe mécatronique PWe est configuré pour 3 types de services : de base, élargi et confort et s'adresse, de ce fait, à des publics variés. Ces entreprises élargissent progressivement leurs gammes de produits par l'apport de nouveaux services aux clients existants et conquièrent également de nouveaux marchés.

Quant au Business Motivation Model¹⁹, créé par l'architecte d'entreprise de Microsoft en 2009 (Nicklas 2013), c'est un outil adapté aux organisations qui se dirigent vers un système de production assorti de services (PSS). L'évolution d'architecture d'entreprise traditionnelle, souvent cloisonnée ou en silo, vers une architecture à orientation services (en anglais : service oriented architecture (SOA²⁶)) est adapté au

²⁶ <http://www.omg.org/spec/SoaML/> (« **SOA (Service Oriented Architecture)** est une façon de décrire et de comprendre des organismes, des communautés et des systèmes, afin de maximiser l'agilité, la graduation et l'interopérabilité. L'approche SOA est simple – les personnes, les organismes et les systèmes fournissent des services entre eux. »

pilotage de cette transition (Berkem 2008). Un extrait de BMM est visible sur la Figure 66.

Cet outil, (BMM), facilite l'opérationnalisation d'un but stratégique et permet, bien entendu, la description des contenus et la définition des acteurs concernés ainsi que les liens qu'il y a entre les différents acteurs en interne aussi bien qu'à l'extérieur de l'entreprise mis en relation par rapport à un objectif clairement défini et limité dans le temps. Cela veut également dire qu'un objectif global est décomposé en différentes étapes qui sont validées par rapport à l'atteinte des objectifs intermédiaires. A chaque validation d'objectifs réalisés, ces derniers sont reformulés ce qui montre à quel point cet outil, le business motivation model, est dynamique dans sa conception et adapté à la gestion de l'activité mécatronique en particulier. Dans ce travail de thèse, il est utilisé en tant que support possible pour les métriques et le modèle de maturité mécatronique que nous avons développés. Il est, en ce sens, recommandé pour les futurs développements.

Ces aspects de notre travail ont été présentés lors des deux conférences : une nationale AIP-Priméca, à La Plagne (73) du 12 au 14 avril 2017 (Tabourot et al. 2017) et une autre internationale pour la recherche et l'enseignement dédiés à la mécatronique REM à Wolfenbüttel en Allemagne du 14 au 16 septembre 2017 (Granon et al. 2017).

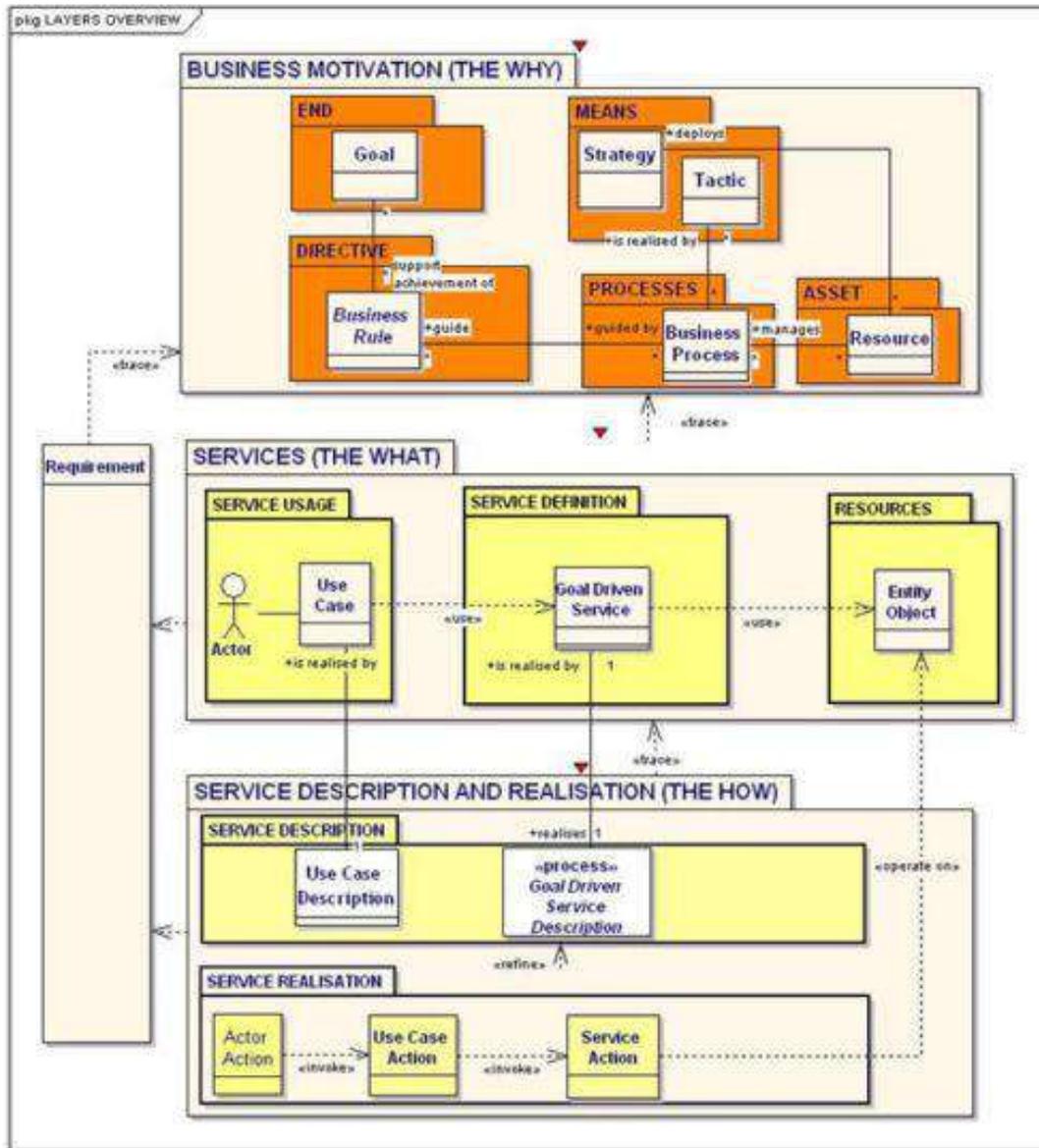


Figure 66 : La façon d’opérationnaliser un but stratégique (WHY ?) et pour un résultat attendu (WHAT?) dans notre cas serait : « entamer une transformation mécatronique ». Le moyen de mise en route (HOW?) ou comment s’y prendre pour y parvenir est d’évaluer le produit par les métriques proposées et les processus existants et planifier à l’aide de ces outils, les premiers pas vers la transformation (voir Figure 25)

Ci-après, le concept de grille de maturité est présenté.

4.6.4. Le concept de grille de maturité

Le concept de grille de maturité porte sur l’obtention du degré maximum de développement d’une activité dans une organisation (Maier, Moultrie, and Clarkson

2012) et (Erling S. Andersen and Jessen 2003). Les grilles de maturité sont des structures qui montrent toutes les étapes nécessaires pour atteindre le niveau maximal d'un phénomène à mesurer. De plus, les grilles de maturité peuvent être appliquées à tous les processus de toutes les entreprises (Grant and Pennypacker 2006). L'utilisation d'une grille de maturité comme méthode d'évaluation permet, entre autres, de développer les capacités et compétences d'une organisation, d'effectuer la comparaison avec d'autres entreprises, de définir des étapes progressives, de choisir la priorisation des pratiques et l'amélioration des processus grâce à la comparaison avec de bonnes pratiques déjà adoptées ou poursuivies par un certain secteur d'activité (Lemieux 2013). Une grille de maturité se représente, de manière schématique, sous forme d'un escalier où les marches montrent les différents niveaux de progrès de maturité pour une pratique particulière (Figure 67).

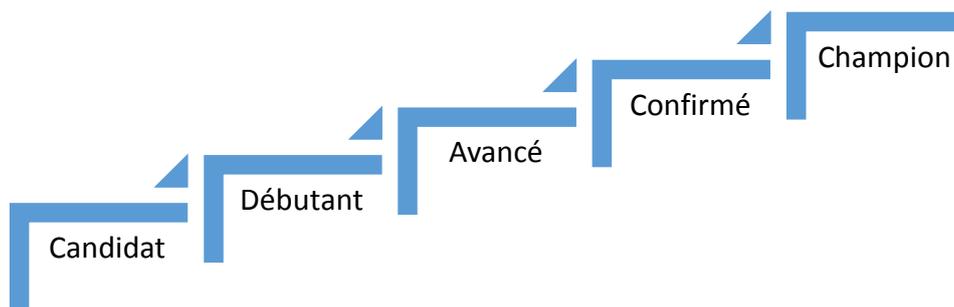


Figure 67 : Représentation graphique d'une grille de maturité – ici, pour la maturité mécatronique

Les niveaux dans une grille de maturité respectent un ordre ascendant vers la maturité. Ceci permet également d'associer une fonction croissante à la grille, en attribuant une valeur numérique à chaque niveau. De cette façon, un plan d'amélioration est plus facile à planifier puisque le manager visualise les étapes à entreprendre. Ces dernières sont présentées par les séquences suivantes dans la grille de maturité. Enfin, les différents niveaux sont définis par l'utilisation des textes descriptifs qui facilitent la compréhension de la grille (Maier et al. 2012). Cela présente un avantage par rapport aux méthodes de mesure basées sur les échelles, comme l'échelle de Likert, par

exemple, soit faible, moyen et fort, où l'évaluation est plus subjective ; en effet, une même situation peut être appréhendée comme faible par un évaluateur plus exigeant et moyenne par un autre se montrant plus consensuel.

Ci-après, le deuxième outil, le modèle pour l'évaluation de la maturité des processus mécatroniques est présenté. Il est constitué de 20 grilles de maturité, soit une pour chaque sous-processus constituant les 6 processus principaux et permet de mesurer l'indicateur de maturité mécatronique IMM.

Enfin, cet outil permet d'effectuer un état des lieux au niveau des processus et de les comparer à un état d'évolution souhaitée.

4.7. L'évaluation de la capacité à évoluer vers la mécatronique

4.7.1. *Les 6 processus mécatroniques identifiés*

Il s'agit, dans cette partie, de proposer un référentiel d'évaluation pour mesurer la capacité d'une entreprise à progresser vers la mécatronique. Ainsi, l'analyse des données recueillies à partir de l'étude de 5 cas présentés ci-haut nous a permis de considérer 6 processus²⁷ comme indispensables à la mécatronique.

Ces 6 processus principaux sont : la recherche et le développement de produits mécatroniques, la veille mécatronique, l'identification des besoins relatifs aux marchés et clients, l'industrialisation, les méthodes et l'innovation ouverte Les processus

²⁷ La typologie des processus retenue pour ce travail est issue de la norme ISO 9001 qui distingue 3 grandes familles de processus : les (1) processus de réalisation qui contribuent à la détection du besoin et vont jusqu'à la satisfaction du client et la réalisation du produit (conception, développement, production), les (2) processus de support qui apportent des moyens et ressources nécessaires à la mise en œuvre des processus de réalisation de produits et services (achats, marketing, RH...), et enfin les (3) processus de direction ou de management qui fournissent les règles de conduite ou politiques et les objectifs et permettent d'orienter les processus de réalisation et de support.

principaux sont composés de plusieurs sous-processus chacun. Dans un souci de simplification, nous les avons nommés : **pratiques et sous-pratiques**.

Le modèle générique pour ces 6 pratiques mécatroniques principales peut être représenté comme montré dans le Tableau 60.

ENTREPRISE	NOTE (1 à 5)	CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
PRATIQUE 1	0	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px; width: fit-content; margin: auto;"> DESCRIPTION DES PRATIQUES ET SOUS-PRATIQUES </div>				
PRATIQUE 2	0					
PRATIQUE 3	0					
PRATIQUE 4	0					
PRATIQUE 5	0					
PRATIQUE 6	0					
INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE GLOBAL	0	INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE	INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE	INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE	INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE	INDICATEUR DE MATURITE MECATRONIQUE

Tableau 60 : Le modèle générique pour l'évaluation de maturité mécatronique

Etant donné que les processus mécatroniques présentés sont composés de flux complexes à l'intérieur de ces organisations, plusieurs activités y sont associées. L'indicateur de maturité mécatronique ou IMM présente donc une structure avec deux niveaux d'agrégation. Le premier montre les 6 processus ou pratiques agrégées et le deuxième représente les phénomènes qui peuvent être observés et décrivent le premier niveau d'agrégation.

Pour résumer, chaque processus ou pratique principale agrégée (6 au total) est associée à un groupe d'actions descriptives que sont les sous-processus et que l'on

appelle dans ce travail sous-pratiques (20 au total), comme montré dans le Tableau 61 :.

ENTREPRISE	ENTREPRISE
PRATIQUE 1	R & D EN MECATRONIQUE
SOUS-PRATIQUE 1	Conception et fabrication de produits mécatroniques
SOUS-PRATIQUE 2	Outils de modélisation multi-physiques
SOUS-PRATIQUE 3	SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques
SOUS-PRATIQUE 4	SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques
SOUS-PRATIQUE 5	SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique
SOUS-PRATIQUE 6	SUPPORT 4 : Outils de créativité mécatronique
PRATIQUE 2	VEILLE EN MECATRONIQUE
SOUS-PRATIQUE 1	Réseaux mécatroniques
SOUS-PRATIQUE 2	Outils de veille mécatroniques
PRATIQUE 3	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients mécatroniques)
SOUS-PRATIQUE 1	Entité marketing dédiée à la mécatronique
SOUS-PRATIQUE 2	Achats / Vente adaptés à la mécatronique
SOUS-PRATIQUE 3	Outils de marketing adaptés à la mécatronique
SOUS-PRATIQUE 4	SUPPORT : Formations mécatroniques
PRATIQUE 4	INDUSTRIALISATION EN MECATRONIQUE
SOUS-PRATIQUE 1	Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique
SOUS-PRATIQUE 2	Outils PLM
SOUS-PRATIQUE 3	Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)
PRATIQUE 5	METHODES EN MECATRONIQUE
SOUS-PRATIQUE 1	Méthodes et tests de qualité mécatroniques
SOUS-PRATIQUE 2	Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique
SOUS-PRATIQUE 3	Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique
PRATIQUE 6	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE
SOUS-PRATIQUE 1	Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers
SOUS-PRATIQUE 2	Intégration des clients
INDICATEUR DE MATURETE MECATRONIQUE	

Tableau 61 : Les 6 pratiques mécatroniques principales avec, chacune, plusieurs sous-pratiques

La méthode d'agrégation est inspirée des travaux en métrologie des systèmes d'innovation de (Ramón et al. 2003) et adaptée à l'usage de petites et moyennes entreprises pour le calcul de leur capacité innovante (Camargo, Boly, and Morel 2015). A notre tour, nous l'adaptions et l'utilisons pour mesurer la capacité d'une entreprise à évoluer vers la mécatronique. La description des 20 sous-pratiques avec les cinq degrés de progression se trouve dans les 20 tableaux correspondants et consultables dans l'Annexe10.

Ci-après, la méthode pour le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique IMM est donnée.

4.8. Méthode de calcul et affichage du diagnostic

4.8.1. Généralités

Le calcul se fait d'après le modèle d'optimisation linéaire (Camargo et al. 2015) qui d'une part, génère un état des lieux pour le niveau actuel de maturité mécatronique en utilisant l'indicateur de maturité mécatronique IMM et affiche, en parallèle, le niveau supérieur. Ce niveau supérieur doit être compris comme la recommandation à suivre pour passer au stade de maturité mécatronique suivant.

L'évaluation de la capacité à évoluer vers la mécatronique se réalise donc sur le deuxième niveau ou au niveau des sous-pratiques. Chacune des six pratiques du premier niveau donc est la somme des sous-pratiques correspondantes du deuxième niveau notées de 1 à 5. La méthode est inspirée de systèmes qui permettent de gérer certains processus à l'intérieur de l'entreprise comme par exemple le « Balance Score Card » (BSC) de (Kaplan and Norton 1996) qui mesure de façon agrégée les indicateurs de performance stratégiques ou encore le référentiel mondial des processus de logistique « Supply Chain Operation Referential » (SCOR) model pour la chaîne d'approvisionnement (Huang, Sheoran, and Keskar 2005).

Dans notre modèle IMM donc, la variable d'entrée correspond à l'évaluation actuelle du niveau de maturité mécatronique et donne comme résultat de sortie la combinaison de réponses au questionnaire de l'IMM. Ce questionnaire est sous-jacent. En effet, nous nous sommes posés des questions auxquelles on peut répondre, de façon

alternative « fait » ou « ne fait pas » une sous-pratique. Une réponse positive, ensuite, nous amène à quantifier l'intensité de cette pratique en choisissant sa description. Ainsi, pour répondre au questionnaire, le modèle choisit une option dans un groupe de 5 réponses possibles. Ce modèle peut, en cela, être comparé aux modèles d'optimisation qui sont largement utilisés par les entreprises pour, d'une part, formaliser les processus et, d'autre part, pour suivre l'état de leur progression (Sarimveis et al. 2008) (Shabani and Sowlati 2013).

Les options proposées à chaque sous-pratique sont choisies entre 5 échelons différents et sont notés de 1 à 5. On doit donc tout d'abord prendre en compte la procédure de réponse à chacune des 20 sous-pratiques proposées.

L'équation suivante montre la procédure de réponse à chacune des 20 questions.

Equation 10

$$R_j = \sum_{k=1}^5 I_{jk} O_k$$

Où :

La variable R_j = la réponse ou l'évaluation de chacune des sous-pratiques j ($j = 1$ à 20)

k = réponse possible

La variable binaire I_{jk} = vaut 1 si l'option de réponse k ($k = 1, 2, 3, 4$ ou 5) et 0 dans le cas contraire

Le vecteur O_k présente la valeur associée à chacune des 5 réponses possibles k ($O_k = [0,2 = candidat; 0,4 = débutant; 0,6 = avancé; 0,8 = confirmé, 1 = champion]$).

Exemple : Disons, qu'une entreprise a un niveau candidat de développement de la sous-pratique X (premier niveau dans la grille de maturité), la variable de réponse choisie R_X peut être représentée ainsi :

$R_X = I_{x1}O_1 + I_{x2}O_2 + I_{x3}O_3 + I_{x4}O_4 + I_{x5}O_5$ et calculée comme suit :

$$R_X = 1 * 0,2 + 0 * 0,4 + 0 * 0,6 + 0 * 0,8 + 0 * 1 = 0,2$$

Par conséquent, l'évaluation de la sous-pratique X est représentée par la valeur allant de 0 et jusqu' à 0,2, ce qui correspond à la première catégorie des 5 définies. La contrainte prise en compte est que chaque sous-pratique doit être évaluée et que cette évaluation est exclusive soit une seule des 5 réponses proposées peut être choisie. Cela correspond à l'équation :

Équation 11

$$\sum_{k=1}^5 I_{jk} = 1$$

Dans le modèle IMM, ce choix s'affichera alors comme montré sur un extrait du modèle de maturité mécatronique dans le Tableau 62.

ENTREPRISE	ENTREPRISE	Actuel	But
PRATIQUE 2	VEILLE	Candidat	Débutant
SOUS-PRATIQUE 1	Réseaux	1 Ne fait partie d'aucun réseau professionnel, ne travaille jamais avec les laboratoires universitaires de recherche et n'intègre jamais de stagiaires d'écoles d'ingénieurs ni de docteurs.	2 Fait partie d'un réseau professionnel, consulte occasionnellement des laboratoires universitaires de recherche, intègre sporadiquement des stagiaires d'écoles d'ingénieurs.
SOUS-PRATIQUE 2	Outils de veille	1 Ne fait pas de veille technologique ni concurrentielle.	2 Commence à faire de la veille technologique en visitant les salons professionnels, en déposant ses propres brevets et en suivant les brevets de la concurrence directe de façon informelle.
PRATIQUE 3	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	Candidat	Débutant
SOUS-PRATIQUE 1	Entité marketing dédiée (protocoles d'essai d'analyse de la valeur)	1 N'a pas de service de marketing, ne s'intéresse pas au marketing de l'innovation, ne fait pas d'analyse de marchés ou de portefeuille clients.	2 N'a pas de service marketing dédié mais quelques personnes dans l'entreprise ont des notions de marketing et s'interfaçent avec les clients, le service de vente et la conception, qui est faite en externe.
SOUS-PRATIQUE 2	Achats / Vente (qualification, fidélisation)	1 Ne sait pas qualifier les besoins des clients autrement que par la réponse à un Cahier de Charges classique et non pas FONCTIONNEL, déterminé par les donneurs d'ordre. Les clients en sont pas fidélisés.	2 Apprend à qualifier les besoins des clients et s'initie à la rédaction d'un CdCFonctionnel pour répondre aux besoins de clients. Fait de la prospection classique et vend des produits peu fonctionnels. A un Service Après Vente classique. Les clients ne sont pas incités à la fidélisation.

Tableau 62 : L'affichage de l'état actuel de maturité mécatronique avec, à côté, l'état poursuivi (but) - un extrait partiel du modèle d'évaluation de l'indicateur IMM

4.8.2. Le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique (IMM)

Pour le calculer, nous devons passer par deux étapes : tout d'abord, nous devons évaluer toutes les sous-pratiques (R_j obtenues par l'Equation 10) ainsi que l'importance de chaque sous-pratique dans sa grande pratique correspondante. Pour ce faire, nous utilisons l'équation suivante :

Équation 12

$$IMM = \sum_{i=1}^6 P_i W_i$$

où :

IMM = indicateur de maturité mécatronique

La variable P_i correspond à la valeur attribuée à chacune des 6 pratiques principales i

i = les 6 pratiques principales évaluées (la veille, l'identification des besoins relatifs aux marchés et clients, la R&D, l'industrialisation, les méthodes et l'innovation ouverte.

W_i = poids²⁸ attribué à chaque pratique

Le calcul de la valeur de chaque pratique est la somme pondérée des sous-pratiques associées par rapport aux 6 pratiques mécatroniques principales. Etant donné que le nombre de sous-pratiques associées est différent pour chaque pratique, chaque variable P_i est définie de façon indépendante mais peut être représenté globalement ainsi :

Evaluation des sous-pratiques

$$P_i = \sum_{j=1}^{20} R_j W_i$$

²⁸ Le poids est défini en fonction de l'opinion des chercheurs ou des spécialistes. Dans le présent travail, nous avons estimé que ces poids étaient équivalents.

L'évaluation de la R&D est définie par les 6 sous-pratiques suivantes : conception, outils de technologie d'information, management de compétences, management de projets, marketing stratégique de l'innovation et outils de créativité se calcule comme suit :

Équation 13

$$P_{R\&D} = \sum_{i=1}^6 R_j W_i$$

L'évaluation de la pratique veille est déterminée par deux sous-pratiques : réseaux et outils de veille et se calcule comme suit :

Équation 14

$$P_{VEILLE} = \sum_{i=7}^8 R_j W_i.$$

L'évaluation de l'identification des besoins de marchés et clients se fait par les quatre sous-pratiques suivantes : entité marketing dédiée (protocoles d'essais d'analyse de la valeur), achats / vente (qualification, fidélisation), l'utilisation des outils comme le cahier de charges fonctionnel et par conséquent l'analyse fonctionnelle des besoins et les formations et se calcule comme suit :

Équation 15

$$P_{IDENTIFICATION\ DES\ BESOINS\ (marchés\ et\ clients)} = \sum_{i=9}^{12} R_j W_i$$

L'évaluation de la pratique industrialisation se base sur les 3 sous-pratiques que sont les équipements productifs, les outils PLM et les activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité) et se calcule comme suit :

Équation 16

$$P_{INDUSTRIALISATION} = \sum_{i=13}^{15} R_j W_i$$

L'évaluation de la pratique méthodes se fait par les 3 sous-pratiques : méthodes et tests de qualité, outils de management de connaissances et intégration des fournisseurs et se calcule comme suit :

Équation 17

$$P_{METHODES} = \sum_{i=16}^{18} R_j W_i$$

Enfin, l'évaluation de la dernière pratique, innovation ouverte, est déterminée par les 2 sous-pratiques : intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers et intégration des clients. Elle est calculée comme suit :

Équation 18

$$P_{INNOVATION OUVERTE} = \sum_{i=19}^{20} R_j W_i$$

Après le calcul du niveau de maturité des 6 pratiques un indicateur global peut enfin être calculé à l'aide de l'équation 12. Avec le modèle IMM présenté dans ce chapitre,

ce calcul est automatique et l'entreprise se voit afficher un résultat global avec, en plus, des recommandations pour l'échelon suivant, comme montré sur un extrait dans le Tableau 62.

4.9. Conclusion

Cette quatrième partie propose donc le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique IMM à l'aide du modèle de maturité afin d'évaluer le niveau atteint des processus plus spécifiquement mécatroniques et constitue ainsi le deuxième outil ou levier qui s'intègre dans l'outil de pilotage stratégique et opérationnel choisi appelé business motivation model (BMM).

Tout d'abord, on a restitué synthétiquement le contenu des entretiens relatifs aux processus mécatroniques spécifiques à partir de cinq études de cas. Ensuite, les concepts auxquels on a fait appel ont été présentés et notamment les systèmes de production et architectures orientées services (Product Systems and Services et Service Oriented Architectures), le modèle économique ou d'affaires et le concept d'innovation ouverte. Enfin, l'outil et la méthode pour le calcul de l'indicateur de maturité mécatronique sont détaillés. A l'application, cet outil permet de constater, pour une entreprise donnée, son niveau de maturité par ses processus mécatroniques existants et de proposer un état d'évolution de processus mécatroniques souhaité comme montré dans le Tableau 62.

4.9.1. *La mutation : comment devient-on mécatronique ?*

Les deux outils développés dans cette thèse, les métriques fonctionnelles et le modèle de maturité de processus mécatroniques, doivent être considérés en tant qu'éléments faisant partie d'un audit. Toute entreprise peut l'effectuer en interne et amorcer ensuite le virage de la mécatronique en connaissance de cause.

Récapitulons : tout d'abord, (1) la décision de faire des produits mécatroniques doit être prise. Ensuite, il convient (2) d'opérer des changements au niveau des compétences (recourir à la consultance, par exemple), des méthodes et des outils et

processus liés. Cela consiste en (3) l'amélioration de l'organisation et des méthodes de travail tout en prenant en compte les contraintes qui existent (en matière d'évaluation de produits, de gestion financière, et de respect de règlements et normes). (4) Il convient d'augmenter la productivité, de créer un bureau d'études mécatronique donc multidisciplinaire et des liens entre tous les services (particulièrement entre les RH, R&D et vente et achats et marketing s'il existe), mettre en place les formations à la sensibilisation entre les différents domaines de métiers et à la vente de produits mécatroniques en particulier. (5) Enfin, il faudra effectuer des audits internes régulièrement et mettre en place des politiques de rémunération des inventeurs, développeurs, créateurs.

En résumé, les métriques fonctionnelles proposées qui répondent à la question « combien un produit est-il mécatronique ? » et le modèle de calcul de l'indicateur de maturité mécatronique qui répond à la question « comment s'organiser pour devenir mécatronique ? », peuvent être adoptés par les petites et moyennes entreprises (PME), les syndicats, pôles de compétitivité, consultants ou encore dirigeants motivés pour établir une stratégie de conception, de production mécatronique et pour mener également une réflexion sur la possibilité de faire évoluer les modèles d'affaires existants vers des modèles d'affaires novateurs.

Ci-après, la conclusion générale est donnée, suivie des limites et perspectives.

Conclusion générale

Dans cette partie du discours, nous aimerions aborder quatre points : donner un court récapitulatif qui nous permet d'élargir la discussion sur les modèles d'affaires, donner une analyse plus générique et proposer enfin des éléments pour la recherche future.

Il s'agit souvent d'entreprises dirigées par des entrepreneurs éclairés qui sentent (voir pressentent) l'évolution avant les autres pour cette génération de firstcomers de la mécatronique. La génération de newcomers qui suivra n'aura pas forcément ces caractéristiques puisque ce seront, forcément, des suiveurs : ils n'ont pas pris le premier train de la mécatronique. Par ailleurs, il faut que les conditions de confiance soient également présentes pour que cela marche ; à cet égard les entreprises familiales semblent des lieux plus propices à ce type de prise de risque (ou ce qui pourrait apparaître comme tel) : ARaymond, Coval, Poclain, Edel Tamp, en sont 4 parfaites illustrations. On rejoint par là le concept d'industrie du futur où ces aspects sont décloisonnés voire globalisés, ce qui n'est pas tout à fait le cas dans le contexte d'industrie 4.0 qui reste focalisé sur un périmètre plus technologique. Pour récapituler donc, les entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique ont une organisation globale qui s'apparente le plus à moderne et flexible, avec une offre de produits composée de produits mécatroniques qui servent à élargir la gamme de produits historiques assortis aujourd'hui de services. De plus, il s'agit d'organisations technologiques innovantes qui maintiennent et enrichissent constamment leurs bases de connaissances et de compétences. Il a également été observé que les entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique ont progressivement évolué vers cette forme optimisée et que c'est le fait d'avoir fait de la recherche et du développement de produits mécatroniques qui leur a permis d'élargir leur gamme de produits qui correspond à ce que l'on appelle être flexible ou encore s'adapter fortement aux environnements et donc marchés et par conséquent être capable de changer de modèles d'affaires. Les produits mécatroniques permettent sinon exigent de nouvelles façons de vendre et assurent en contrepartie des rentes prometteuses.

Pour avoir accès à ces rentes prometteuses, il convient, bien entendu, de faire des produits mécatroniques d'abord, mais encore faut-il penser à un cadre managérial qui permet de structurer cette ambition en la décomposant en actions concrètes définies

dans le temps et par rapport aux résultats attendus mesurés par des indicateurs adaptés.

D'un point de vue historique ou évolutionnel, le BMM est le dernier né de la famille de business models ou plans d'affaires classiques, initiés dans les années 1950. Il est fortement lié à l'évolution de l'informatique et par conséquent à la modélisation de l'entreprise. Les recherches de (Wirtz 2016) proposent des pistes intéressantes au sujet de modèles d'affaires. Quant à (Nicklas 2013), l'auteur du BMM, il conseille son utilisation lorsque l'on veut obtenir des résultats attendus dans le contexte d'organisations complexes. Aussi, c'est un outil qui favorise la cohabitation de plusieurs modèles d'affaires et va donc permettre la gestion de flux entre plusieurs parties prenantes aussi bien au sein d'une même entreprise qu'entre plusieurs partenaires. D'après son auteur, les outils d'architecture organisationnelle, TOGAF notamment, se sont révélés moins adaptés au besoin spécifique de faire cohabiter plusieurs modèles d'affaires au sein d'une même organisation. Ceci étant, le BMM est un outil qui peut s'intégrer dans TOGAF également. Tout est alors une question de stratégie et de volonté d'adoption. Cependant, comme montré par la recherche de (Chesbrough 2010)²⁹, les organisations sont plus habituées à innover en matière de produit qu'en matière de modèles d'affaires, ce qui peut être considéré comme une erreur à rattraper. Les candidates à la mécatronique devront donc également prendre en considération cette forme d'innovation et fournir un effort complémentaire à cet égard.

Référentiel mécatronique spécifique

L'objectif de ce travail de thèse était d'identifier et de proposer un référentiel ou standard organisationnel de la mécatronique pour les entreprises qui souhaitent s'engager dans cette voie. Cette ambition a été traduite en question de recherche spécifique suivante : « *Par quels moyens objectifs et reproductibles les petites et moyennes entreprises traditionnelles mécaniques du secteur de décolletage peuvent-*

²⁹ "Companies commercialize new ideas and technologies through their business models. While companies may have extensive investments and processes for exploring new ideas and technologies, they often have little if any ability to innovate the business models through which these inputs will pass."

elles être aidées lorsqu'elles choisissent de s'engager dans la conception et production mécatroniques ? » Cela revenait à se poser des questions comme « *que devons-nous mesurer ou surveiller ?* » et « *comment s'organiser pour arriver à faire de la mécatronique, voire, devenir un jour champion mécatronique ?* ». Finalement, deux leviers ou outils complémentaires ont été proposés à cet effet et permettent, aujourd'hui, de déterminer cinq différents niveaux de performance dans la pratique mécatronique que nous définissons, par ailleurs, par la conception, la production et vente des produits mécatroniques et les services qui leur sont associés.

D'une façon plus générale et par rapport au contexte de l'industrie.4.0 et de l'usine du futur, ce travail de thèse permet de dégager des traits mécatroniques plus génériques, visibles dans le Tableau 63.

Référentiel mécatronique générique

Ce travail montre, en effet, que l'évolution de ces entreprises est typique et peut être anticipée. Les métriques ont été mises en place de façon formelle et traduisent finalement cette évolution. Ceci nous amène à proposer une taxonomie des produits mécatroniques (visible dans le Tableau 63) et permet de classer les fabricants mécatroniques en 4 catégories : les fabricants de composants qui sont des entreprises fournisseurs de rang 3, les fabricants d'éléments de liaison comme les roulements par exemple qui sont des entreprises fournisseurs de rang 2 et les fabricants de convertisseurs ou systèmes de pilotage qui sont des fournisseurs de rang 1 pour les assembleurs et assembleurs qui sont des donneurs d'ordre premier comme les constructeurs dans l'automobile ou l'aéronautique par exemple. Notre étude a porté sur les fournisseurs de rang 1 et 2. La quatrième catégorie, à colonne vide pour l'instant, est réservé aux fabricants de systèmes extrêmement complexes que nous n'avons pas étudiés pour l'instant.

Il y a donc une « commutation »³⁰ qui se produit de façon incontournable. A savoir, à partir d'un cœur de métier, maîtrisé et propre à chaque entreprise, il y a, à un moment donné, un tassement et une fonctionnalisation du produit qui va du composant au convertisseur en passant par les éléments de liaison, de guidage et de structure.

	Les candidats	Evoluant vers la mécatronique	Les Champions mécatroniques	Les « hors normes »
	Fournisseurs de rang 3	Fournisseurs de rang 2	Fournisseurs de rang 1	Ensembleurs Assembleurs
Type de produit	Composants	Eléments de liaison et de guidage	Convertisseurs Systèmes dynamiques	Systèmes de systèmes ?
		Eléments de structure		
Secteur d'activité	Décolletage	Roulements	Information embarquée	
Type d'assemblage	Pas d'assemblage	Assemblages simples Actionnement	Assemblages complexes Pilotage	
Fonction	Mesurer	Actionner Instrumenter	Communiquer, échanger de l'information, adapter	

Tableau 63 : Traits génériques détectables dans le panorama mécatronique permettant de proposer une taxonomie de la mécatronique

Le secteur d'activité mécatronique évolue ainsi du décolletage régi par la fabrication de pièces et l'absence d'assemblages, même simples, à la maîtrise de l'information embarquée qui assure le pilotage de systèmes complexes en passant par les roulements instrumentés qui sont des éléments de structure, de liaison et de guidage, par exemple.

De façon plus générale donc, cette étude permet de proposer une lecture de la mécatronique qui évolue de façon plutôt séquentielle depuis le produit mécanique mono-domaine non communiquant au produit numérisé multi-domaines et communiquant avec d'autres systèmes en passant par les étapes d'instrumentation

³⁰ Source lexicale : <http://www.cnrtl.fr/lexicographie/commutation>

analogique d'abord et l'instrumentation par l'informatique embarquée ensuite. Cette dernière représente le vrai passage à la mécatronique et entraîne l'entreprise vers la numérisation de ses produits ainsi que ses moyens de production et donc vers l'usine du futur voire l'industrie 4.0.

Limites

Même si ce travail de thèse dégage des caractéristiques importantes des entreprises mécatroniques, les limites de ce travail sont nombreuses. Tout d'abord, elles sont relatives au périmètre choisi, aux méthodes utilisées ainsi qu'à la façon de proposer les métriques. Nous pensons que d'autres angles de vue doivent être exploités et notamment la description de systèmes étudiés pourrait se faire à l'aide du langage SysML et par l'utilisation du bond graph. Il en est de même quant au choix du Business Motivation Model pour le pilotage et la formulation de modèles d'affaires qui a été choisi comme un modèle idéal à atteindre même si des alternatives existent (le concept de canevas d'Osterwalder ou le Balanced Score Card de Kaplan, plus éprouvés et d'autres encore ne nécessitent pas forcément d'être gérés par ce biais-là). Par ailleurs nous avons pu oublier des éléments de l'entreprise « humaniste » représentée par la légende entrepreneuriale qu'est Google, par exemple et par là tous les aspects de l'adoption des innovations.

Enfin, la métrique de dématérialisation représentée par les indicateurs ne prend pas suffisamment bien en compte la capacité de communication du produit avec d'autres systèmes, comme l'Ethernet dans le cas de LEMCOM de Coval et doit être améliorée.

Bibliographie

ACEA. 2016. "Association Des Constructeurs Européens de l'Automobile."
Retrieved (<http://www.acea.be/about-acea/acea-members>).

Adams, Richard, John Bessant, and Robert Phelps. 2006. "Innovation Management Measurement: A Review." *International Journal of Management Reviews* 8(1):21–47.

Adler, Paul. 2013. "The Collaborative , Ambidextrous Enterprise." *Universia Business Review* 40:34–51.

AFNOR, Normalisation. 2008. *NF E 01-010 Vocabulaire Mécatronique*.

AFNOR, Normalisation. 2009. *Norme Expérimentale T2 Cycle de Vie et Conception Des Produits*.

AFNOR, Normalisation. 2013. *NF EN 16271 Management Par La Valeur - Expression Fonctionnelle Du Besoin et Cahier de Charges Fonctionnel*.

Aïm, Roger. 2016. *La Gestion de Projet*. 5ème. edited by L. Éditions. Issy-les-Moulineaux: Gualino éditeur.

Ajah, Sylvester, Ali Al-Sherbaz, Scott Turner, and Phil Picton. 2015. "Machine-to-Machine Communications Energy Efficiencies: The Implications of Different M2M Communications Specifications." *Int. J. Wire. Mob. Comput.* 8(1):15–26.
Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1504/IJWMC.2015.066752>).

Alazard, Claude and Sabine Sépari. 2007. *Contrôle de Gestion*. Paris: Dunod.

Alchian, A. and H. Demsetz. 1972. "Production, Information Costs, and Economic Organization." *American Economic Review* 62:777–95.

Altheide, David L. 1994. "Criteria for Assessing Interpretive Validity in Qualitative Research." P. 643 in *Handbook of qualitative research*, edited by Y. S. (Ed) John M. Denzin, Norman K. (Ed); Lincoln. Thousand Oaks, CA, US: Sage Publications, Inc, xii, 643 pp.

- Andersen, E. S. and S. A. Jessen. 2003. "Project Maturity in Organizations." *International Journal of Project Management* 21:457–61.
- Andersen, Erling S. and Svein Arne Jessen. 2003. "Project Maturity in Organisations." *International Journal of Project Management* 21(6):457–61.
- Anon. Arrow, K. 1974. *The Limits of Organization*. New York: Norton.
- Artema. 2016. "Syndicat de La Mécatronique." Retrieved (<http://www.artema-france.org/je-suis/un-client-de-la-profession/presentation-dartema/>).
- ARUCO. 2014. "Geoffray Sylvain." ARUCO. Retrieved (<http://aruco.com/2014/06/smart-city-ville-connectee/>).
- Baines, T. S., H. W. Lightfoot, O. Benedettini, and J. M. Kay. 2009. "The Servitization of Manufacturing: A Systematic Literature Review of Interdependent Trends." *Journal of Manufacturing Technology Management* 20(5):547–67.
Retrieved (<http://www.emeraldinsight.com.proxy.findit.dtu.dk/doi/full/10.1108/17410380910960984>).
- Barrales-Molina, Vanesa, Óscar F. Bustinza, and Leopoldo J. Gutiérrez-Gutiérrez. 2012. "Explaining the Causes and Effects of Dynamic Capabilities Generation: A Multiple-Indicator Multiple-Cause Modelling Approach." *British Journal of Management* 24(4):571–91.
- Benghozi, Pierre-Jean, Martin Cave, Yannick Meiller, Alain Ropert, Samuel Vall, and Yves Gassot. 2012. "Internet of Things." *DigiWorld Economic Journal*.
- Berkem, Birol. 2008. "From the Business Motivation Model (BMM) to Service Oriented Architecture (SOA)." *Journal of Object Technology* 7(8):57–70.
- Blattberg, Robert C., Gary Getz, and Jacquelyn S. Thomas. 2001. *Customer Equity*. Harvard School Press.
- Bonjour, Eric. 2008. *Contributions À L'instrumentation Du Métier D'architecte Système : De L'architecture Modulaire Du Produit À L'organisation Du Système de Conception*.

Bonjour, Eric, Samuel Deniaud, Maryvonne Dulmet, and Ghassen Harmel. 2009. "A Fuzzy Method for Propagating Functional Architecture Constraints to Physical Architecture." *Journal of Mechanical Design* 131(6):61002.

Bonjour, Eric, Samuel Deniaud, and Jean Pierre Micaëlli. 2013. "A Method for Jointly Drawing up the Functional and Design Architectures of Complex Systems during the Preliminary System-Definition Phase." *Journal of Engineering Design* 24(4):305–19.

Bonjour, Eric and Jean-Pierre Micaëlli. 2010. "Design Core Competence Diagnosis : A Case from the Automotive Industry. Design Core Competence Diagnosis : A Case from the Au- Tomotive Industry." *IEEE Transactions on Engineering Management, Institute of Electrical and Electronics Engineers* 57(2):323–37.

Bosch. 2016. "The Bosch IoT Suite." 12. Retrieved (https://www.bosch-si.com/media/en/bosch_software_innovations/documents/brochure/products_2/bosch_iot_suite/brochure2016.pdf).

Bricogne, M. 2014. "Thesis: Méthode Agile Pour La Conception Collaborative Multidisciplinaire de Systèmes Intégrés : Application À La Mécatronique."

Brion, Sébastien, Véronique Favre-bonté, and Caroline Mothe. 2008. "Quelles Formes D'ambidextrie Pour Combiner Innovations D'exploitation et D'exploration ?" 12(3):0–34.

Camargo, M., V. Boly, and L. Morel. 2015. *Mesurer L'innovation En Entreprise : Un Levier Essentiel Pour La Réussite Des Projets Innovants*. Vol. 1. edited by Editions Universitaires de Lorraine. Nancy, France: Presses Universitaires de Nancy. Retrieved (<http://catalogue.scd.u-psud.fr/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=269580>).

CCI Alpes Maritimes. 2013. *Atlas Des Compétences Mécatroniques*. Retrieved (https://issuu.com/ccinicecotedazur/docs/etude_m__catronique_-_alpes_maritim).

CCI Auvergne-Rhône-Alpes. 2016. *Coup de Projecteur*.

Cetim. 2011. "Centre Technique Des Industries Mécaniques." Retrieved (<http://www.cetim.fr/fr/Marches/Composants-mecaniques?mode=programme&id=245>).

Chandler, A. D. 1962. "Strategy and Structure."

Chesbrough, Henry. 2003. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Boston: Harvard Business School Press.

Chesbrough, Henry. 2010. "Business Model Innovation: Opportunities and Barriers." *Long Range Planning* 43(2–3):354–63. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.010>).

Chesbrough, Henry and Richard S. Rosenbloom. 2002. "The Role of the Business Model in Capturing Value from Innovation: Evidence from Xerox Corporation' S Technology Spin-off Companies." *Industrial and Corporate Change* 11(3):529–55.

CMMI. 2010. "CMMI for Development Quick Reference." *Cmmi-Dev* 1(3):1–12.

Cohen, Wesley M. and Daniel A. Levinthal. 1990. "Absorptive Capacity : A New Perspective on and Innovation Learning." 35(1):128–52.

Cooke-Davies, T. and A. Arzymanow. 2003. "The Maturity of Project Management in Different Industries: An Investigation into Variations Between Project Management Models." *International Journal of Project Management* 21:471–78.

Crossan, Mary M. and Marina Apaydin. 2010. "A Multi-Dimensional Framework of Organizational Innovation : A Systematic Review of the Literature." *Journal of Management Studies* 47(6):1154–91.

Damjanović, Violeta, Wernher Behrendt, Manuela Plößnig, and Merlin Holzapfel. 2007. "Developing Ontologies for Collaborative Engineering in Mechatronics." Pp. 190–204 in *The Semantic Web: Research and Applications ESWC 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol 4519*, edited by F. E., K. M., and W. May. Berlin, Heidelberg: Springer.

David, Albert, Armand Hatchuel, and Romain Laufer. 2012. *Logique, Épistémologie et Méthodologie En Sciences de Gestion : Trois Hypothèses Revisitées*. Les nouvelles. Paris: Mines ParisTech, Dauphine Université Paris, HEC Paris. Retrieved (https://www.mendeley.com/research-papers/logique-épistémologie-et-méthodologie-en-sciences-gestion-trois-hypothèses-revisitées/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.8&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7B137e1382-6e24-4c02-b100-511a00722b3c%7D).

Demri, Amel. 2010. "Contribution À L'évaluation de La Fiabilité D'un Système Mécatronique Par Modélisation Fonctionnelle et Dysfonctionnelle." Université d'Angers.

Dumez, Hervé. 2013. "Qu'est - Ce Qu'un Cas, et Que Peut - on Attendre D'une Étude de Cas ?" *Le Libellio* 9(2):13–26.

Escaffre, Lionel. 1999. *La Qualité D ' Une Représentation Comptable de La Performance*. Paris. Retrieved (<https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00587791/document>).

Fédération des Industries Mécaniques (FIM). 2015. "Guide Pratique de L'usine Du Futur." 1–61.

Ford, J. D. and W. H. Hergarty. 1984. "Decision Maker's Beliefs about the Causes & Effects of Structure: An Exploratory Study." *Management Journal* 27(2):271–91.

Gagnon, Y. C. 2005. "L'étude de Cas Comme Méthode de Recherche." P. 128 in *Relations industrielles*. Québec: Presses Universitaires du Québec. Retrieved (<http://id.erudit.org/iderudit/013730ar>).

Gandia, Romain, Sébastien Brion, and Caroline Mothe. 2011. "Innovation Ouverte et Management de La Propriété Intellectuelle. Quelles Stratégies Dans Le Jeu Vidéo ?" *Revue Française de Gestion* 37:117–31.

Giannelloni, Jean-Luc and Eric Vernet. 2012. *Etudes de Marchés*. 3ème. Paris: Vuibert.

Giordano, Yvonne and Alain Jolibert. 2012. "Spécifier L'objet de La Recherche." Pp. 47–86 in *Méthodologie de la recherche. Réussir son mémoire ou sa thèse en sciences de gestion*. Pearson Education.

Granon, Leonida, Laurent Tabourot, Pascale Balland, and El-Housseine El-Hamed. 2017. "A Standard Framework for Mechatronics: Proposal of Scalable Levers for SMO's to Evolve towards Mechatronics." in *REM Conference, IEEE Transactions on Engineering Management*. Wolfenbüttel.

Grant, Kevin P. and James S. Pennypacker. 2006. "Project Management Maturity: An Assessment of Project Management Capabilities among and between Selected Industries." *IEEE Transactions on Engineering Management* 53(1):59–68.

Hamida, Sonia Ben et al. 2015. "A Comparative Case Study of Functional Models to Support System Architecture Design." *Procedia Computer Science* 44(C):325–35.

Hammouda, Naima, Georges Habchi, Christine Barthod, and Olivier Duverger. 2013. "Mise En Œuvre D'une Méthodologie D'évaluation de La Fiabilité Pour Les Systèmes Mécatroniques." Pp. 1–6 in *21ème congrès Français de Mécanique*. Bordeaux, France: hal-00873677.

Hargadon, Andrew B. 2002. "Brokering Knowledge: Linking Learning and Innovation." *Research in Organizational Behaviour* 24:41–85.

Hargadon, Andrew and Angelo Fanelli. 2002. "Action and Possibility : Reconciling Dual Perspectives of Knowledge in Organizations." *Organization Science* 13(3):290–302.

Hargadon, Andrew and Robert I. Sutton. 1997. "Technology Brokering and Innovation in a Product Development Firm." *Administrative Science Quarterly* 42(4):716–49. Retrieved (<http://www.jstor.org/stable/2393655><http://www.jstor.org/stable/pdfplus/2393655.pdf>).

Hehenberger, Peter. 2012. *Advances in Model-Based Mechatronic Design*. Linz:

Trauner Verlag.

Hehenberger, Peter and Klaus Zeman. 2005. "Evaluation of Modular Design Concepts of Complex Mechatronic Systems." Pp. 1–8 in *Proceedings of IDETC/CIE 2005*.

Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster, Johannes Helbig. 2013. "Umsetzungsempfehlungen Für Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0." *Bmbf.De* (April):1–116.

Hermann, Mario, Tobias Pentek, and Boris Otto. 2015. *Working Paper: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*.

Huang, Samuel H., Sunil K. Sheoran, and Harshal Keskar. 2005. "Computer-Assisted Supply Chain Configuration Based on Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model." *Computers & Industrial Engineering* 48(2):377–94. Retrieved June 14, 2017 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835205000021>).

iDate Forum. 2015. "iDATE Consulting Connected Things Forum." *Connected Things as a Strong Market Game Changer?* Retrieved (<http://blog.idate.fr/?s=80+billion+connected+objects+by+2020>).

iDate Forum. 2016. "Smart City : First Scorecard and New Prospects." Retrieved (<http://blog.idate.fr/?s=connected+city>).

INSEE. 2008. "Quatre Nouvelles Catégories D'entreprise." Retrieved (<https://insee.fr/fr/statistiques/1281134>).

INSEE. 2016. "Les Entreprises En France - Insee Références - Edition 2016." *L'investissement Des Entreprises Par Secteur*. Retrieved (<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2497041?sommaire=2497179>).

INSEE, Michel Bonnet, and Henri Lavergne. 2013. "Rhône-Alpes : En Position Médiane Parmi Les Principales Régions Industrielles Européennes." *La Lettre, Analyses* (N° 203):6. Retrieved (<https://insee.fr/fr/statistiques/1291705>).

Kagermann; Henning. 2014. "Industrie 4 . 0 – What Can the UK Learn from

- Germany ' S Manufacturing Strategy ?" *Royal Academy of Engineering* (February):0–26.
- Kaplan, Robert S. and David P. Norton. 1996. "The Balanced Scorecard – Measures That Drive Performance The Balanced Scorecard — Measures." *Harvard Business Review* 71–79.
- Kellner, A. and P. Hehenberger. 2014. "Hierarchical System Modeling for an Industrial Gantry Robot." in *Forum International Conference, Mechatronics*. Karlstad, Sweden.
- Kerzner, Harold. 2004. *Advanced Project Management: Best Practices on Implementation*. John Wiley.
- Klein, Benjamin and Keith B. Leffer. 1981. "The Role of Market Sources in Assuming Contractual Performance." *Journal of Political Economy* 89(41):615–41.
- Lane, Peter J., Balaji R. Koka, and Seemantini Pathak. 2006. "The Reification of Absorptive Capacity: A Critical Review and Rejuvenation of the Construct." *Academy of Management Review* 31(4):833–63.
- Lemieux, Nathalie. 2013. "Création et Adoption de Pratiques Pour La Conduite Du Changement : Une Démarche Évolutive Au Sein D'une Entreprise Québécoise." *Question(s) de Management* 3(2):67. Retrieved (<http://www.cairn.info/revue-questions-de-management-2013-2-page-67.htm>).
- Lô, Mamabaye. 2013. "Thesis: Contribution À L'évaluation D'architectures En Ingénierie Système : Application En Conception de Systèmes Mécatroniques." Université Montpellier II.
- Lorino, Philippe. 2003. *Méthodes et Pratiques de La Performance: Le Pilotage Par Les Processus et Les Compétences*. Editions d'Organisations. Retrieved (<https://books.google.com/books?id=dO5yPQAACAAJ&pgis=1>).
- Mahut, F., J. Daaboul, M. Bricogne, and B. Eynard. 2015. "Survey on Product-Service System Applications in the Automotive Industry." *IFAC-PapersOnLine*

28(3):840–47. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.188>).

Maier, Anja M., James Moultrie, and P. John Clarkson. 2012. “Assessing Organizational Capabilities.” *Reviewing and Guiding the Development of Maturity Grids* 59(1):138–59. Retrieved (https://www.wiso-net.de/document/ECON__687937566).

Majchrzak, Ann, Lynne P. Cooper, and Olivia E. Neece. 2004. “Knowledge Reuse for Innovation.” *Management Science* 50(2):174–88.

March, James G. 1991. “Exploration and Exploitation in Organizational Learning.” *Organization Science* 2(1):71–87.

Mathews, J. A. and H. J. Coleman. 1997. “Organizing in the Knowledge Age: Anticipating the Cellular Form.” *Academy of Management Executive Journal* 11(4):7–20.

Mcombs, Red, Raji Srinivasan, and Pamela Haunschild. 2007. “Vicarious Learning in New Product Introductions Learning the Early Years of a Converging Market.” *Management Science* 53(1):16–28.

Merriam, S. B. 1998. *Case Study Research in Education: A Qualitative Approach*. CA: Jossey-Bass.

Miles, M. B. and A. M. Huberman. 2013. *Analyse Des Données Qualitatives, Méthodes En Sciences Humaines*. 2ème édit. edited by D. Boeck. Bruelles: Sage.

Miles, Raymond A. and Charles C. Snow. 2007. “Organization Theory and Supply Chain Management: An Evolving Research Perspective.” *Journal of Operations Management* 25(2):459–63.

Milgrom, P. and J. Roberts. 1990. “The New Theory of the Firm: Efficiency of Equity in Organizational Decision Processes.” *The American Economic Review*, 154–59. Retrieved (<http://www.jstor.org/stable/10.2307/2006561>).

Milgrom, Paul and John Roberts. 1994. “Complementarities and Systems: Understanding Japanese Economic Organization.” *Estudios Economicos*

9(1993):3–42.

Milgrom, Paul and John Roberts. 1995. “Complementaries and Fit Strategy, Structure, and Organizational Change in Manufacturing.” *Journal of Accounting and Economics* 19:179–208.

Mintzberg, Henry. 1980. “Structures in 5’s : A Synthesis of the Research on Organization Design.” *Management Science* 26(3):322–41.

Mintzberg, Henry. 1989. “The Structuring of Organizations.” in *Readings in Strategic Management*, edited by D. Asch and E. All. Macmillian Publihers Limited. Retrieved (http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-349-20317-8_23#page-1).

Mintzberg, Henry and Frances Westley. 1992. “Cycles of Organizational Change.” *Strategic Management Journal* 13(Fundamental Themes in Strategy Process Research):39–59. Retrieved (<papers2://publication/uuid/09DEF5A6-DA26-4641-AC36-899D56D3F3A6>).

Mone, M. A., W. McKinley, and V. L. Barker. 1998. “Organization Decline and Innovation: A Contingency Framework.” *Academy of Management Review* 23(1):115–32.

Mont-Blanc Industries. 2006. “Pôle de Compétitivité.” Retrieved (<http://www.montblancindustries.com/adherents/>).

Muller, P., M. Schmidt-Kretschmer, and Lucienne T. M. Blessing. 2007. “Function Allocation in Product-Service System - Are There Analogies between PSS and Mechatronics?” *AEDS 2007 Workshop* (October):47–55.

Newcomb, P. J., B. Bras, and D. W. Rosen. 1998. “Design Theory and Methodology Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle.” *Journal of Mechanical Design* 120(3):483–90.

Nicklas, Malik. 2013. “Enterprise Business Motivation Model: Full Model.” *Architecture Journal* 1–77. Retrieved (<https://blogs.msdn.microsoft.com/nickmac/2009/05/21/the-architecture-journal/>).

- O'Reilly, Charles A. and Michael L. Tushman. 2004. "The Ambidextrous Organization." *Harvard Business Review* 82(4).
- Oliva, Rogelio and Roger Kallenberg. 2003. "Managing the Transition from Products to Services." *International Journal of Service Industry Management* 14(2):160.
- Omg. 2010. "Business Motivation Model." *Omg* (November):/.
- Osterwalder, Alexander. 2004. "Thesis: The Business Model Ontology: A Proposition in a Design Science Approach." EPFL Lausanne. Retrieved (http://www.hec.unil.ch/aosterwa/PhD/Osterwalder_PhD_BM_Ontology.pdf).
- Pavlou, Paul A. and Omar A. El Sawy. 2011. "Understanding the 'Black Box' of Dynamic Capabilities." *Decision Sciences Journal of Innovative Education* 42(1):239–73.
- Penas, Olivia, R. Plateaux, Jean-Yves Choley, and A. Rivière. 2009. "The Different Complexity Levels in Mechatronic Design Process." P. 12 in *Information Management and Applications - SKIMA*,. Fes, Morocco.
- Penrose, Edith. 1959. *The Theory of the Growth of the Firm*. edited by Wiley. New York.
- Peugeot. 2017. "Peugeot Instinct Concept." Retrieved January 1, 2017 (<http://www.clubic.com/mag/diaporama/photo-peugeot-instinct-concept-mwc-86556/>).
- Pimmler, Thomas U. and Steven D. Eppinger. 1994. "Integration Analysis of Product Decompositions." Pp. 342--351 in *Proceedings of the 1994 ASME Design Theory and Methodology Conference*. Minneapolis.
- Piore, Michael and Charles F. Sabel. 1986. *The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity*. Basic Books. Retrieved (<https://www.amazon.fr/Second-Industrial-Divide-Possibilities-Prosperity/dp/0465075614>).
- Pirès, Alvaro. 1997. "Échantillonnage et Recherche Qualitative : Essai Théorique

et Méthodologique.” *La Recherche Qualitative : Enjeux Épistémologiques et Méthodologiques* 113–72.

Polt, Wolfgang and Fritz Ohler. 1995. *OCDE*. Seibersdorf. Retrieved (<http://www.oecd.org/fr/general/resultatsdelarecherche/?q=mécatronique&cx=012432601748511391518:xzeadub0b0a&cof=FORID:11&ie=UTF-8>).

Pop, Ioan G. and Vistriean Măties. 2010. “Sustainable Strategies in Mechatronical Education as Vocational Training Environment.” *Problems of Education in the 21st Century* 19(19):94–102.

Pop, Ioan G. and Vistriean Măties. 2011. “Transdisciplinary Approach of the Mechatronics in the Knowledge Based Society.” Pp. 270–300 in *Advances in Mechatronics*, edited by Prof. Horacio Martinez-Alfaro.

Porter, Michael and Victor E. Millar. 1985. “How Information Gives You Competitive Advantage.” *The Harvard Business Review* 63(4):139–49.

Project Management Institute. 1995. “PMI.” Retrieved (<https://pmi-france.org/branches/rhone-alpes>).

PwC. 2016. “Industry 4.0.” Retrieved (<http://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4.0.html>).

Ramahandry, Tiana. 2016. *Smart Home : Un Marché Prometteur À Long Terme*. Retrieved (<http://blog.idate.fr/?s=Connected+things+>).

Ramirez Gonzalez, Nydia. 2009. “Thesis: Contribution À L’amélioration Des Processus À Travers La Mesure de La Maturité de Projet : Application À L’automobile.” Ecole Centrale Paris.

Ramón, José, Corona Armenta, Vincent Boly, and Bastien Lepage. 2003. “Métrologie et Systèmes D’innovation.” 183–89.

Renaud, Angèle and Nicolas Berland. 2007. “Mesure de La Performance Globale Des Entreprises.” *28ème Congrès* 1–23.

Ropert, Samuel. 2016. “Telco’s Connected Objects Strategies: How to Compete

with OTT Players.” *iDate Digi World Blog*. Retrieved (<http://blog.idate.fr/telcos-connected-objects-strategies-how-to-compete-with-ott-players/>).

Rosch, Eleanor. 1978. “Principles of Categorization.” Pp. 1–25 in *Cognition and Categorization*, vol. 27, edited by B. B. (eds) Rosch, Eleanor and Lloyd. California.

Roy, S. N. 2003. “L’étude de Cas.” Pp. 159–84 in *Recherche sociale. De la problématique à la collecte de données*, edited by B. Gauthier (Dir). Québec: Presses de l’Université du Québec.

Royer, Isabelle and Philippe Zarlowski. 2007. “Echantillons.” Pp. 192–227 in *Méthodes de recherche en management*. Paris: Dunod.

Sallez, Yves. 2012. *Produit “actif” tout Au Long de Son Cycle de Vie*. Valenciennes. Retrieved (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00768771/>).

Sanislav, Teodora and Liviu Miclea. 2012. “Cyber-Physical Systems - Concept, Challenges and Research Areas.” *Journal of Control Engineering and Applied Informatics* 14(2):28–33. Retrieved (<http://www.ceai.srait.ro/index.php/ceai/article/view/1292%5Cnhttp://www.ceai.srait.ro/index.php/ceai/article/download/1292/968>).

Sarimveis, Haralambos, Panagiotis Patrinos, Chris D. Tarantilis, and Chris T. Kiranoudis. 2008. “Dynamic Modeling and Control of Supply Chain Systems: A Review.” *Computers & Operations Research* 35(11):3530–61. Retrieved June 14, 2017 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305054807000366>).

Shabani, Nazanin and Taraneh Sowlati. 2013. “A Mixed Integer Non-Linear Programming Model for Tactical Value Chain Optimization of a Wood Biomass Power Plant.” *Applied Energy* 104:353–61. Retrieved June 14, 2017 (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912008069>).

Shane, Scott A. and Karl T. Ulrich. 2004. “50th Anniversary Article: Technological Innovation, Product Development, and Entrepreneurship in Management Science.” *Management Science* 50(2):133–44. Retrieved (<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/mnsc.1040.0204>).

Silverman, D. 2001. *Interpreting of Qualitative Data, Methods for Analysing Talk, Text, and Interaction*. edited by Sage. London.

Simon, H. A. 1962. "The Architecture of Complexity." Pp. 467–82 in *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 106. Retrieved (<http://nicoz.net/images/ArchitectureOfComplexity.HSimon1962.pdf>).

Srivastava, Manish K. and Devi R. Gnyawali. 2011. "When Do Relational Resources Matter? Leveraging Portfolio Technological Resources for Breakthrough Innovation." *Academy of Management Journal* 54(4):797–810.

Stake, R. E. 2000. "Case Studies." Pp. 435–54 in *Handbook of Qualitative Research*, edited by N. K. Denzin & Y. S. Lincoln. Thousand Oaks, CA.

Stake, R. E. 2005. "Qualitative Case Studies." Pp. 443–66 in *The Sage Handbook of Qualitative Research*, edited by N. K. D. & Y. S. Lincoln. Thousand Oaks, CA: Sage.

Tabourot, Laurent, Leonida Granon, Pascale Balland, and El-Housseine El-Hamed. 2017. "Evaluation Du Degré de Mécatronicité D'un Produit." Pp. 13–16 in *15e Colloque National AIP-Primeca La Plagne(73) - 12 au 14 avril 2017*.

Thésame. 2017. "Mécatronique Management." Retrieved (<http://www.thesame-innovation.com/Thesame/Present/Thesame.php>).

Thiétart, Raymond-Alain and Et Coll. 2007. *Méthodes de Recherche En Management*. 3e ed. edited by Dunod.

Tukker, Arnold. 2004. "Eight Types of Product Service Systems." *Business Strategy and the Environment* 13:246–60.

Turki, Skander. 2008. "Thesis: Ingénierie Système Guidée Par Les Modèles : Application Du Standard IEEE 15288, de L'architecture MDA et Du Langage SysML À La Conception Des Systèmes Mécatroniques." Supmeca Toulon. Retrieved (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00344722/en/>).

Tushman, Michael L. and Charles A. O'Reilly. 1996. "Ambidextrous Organizations." *California Management Review* 38(4):8–30.

Ulrich, Karl. 1995. "The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm." *Research Policy* 24:419–40.

Van de Ven, Andrew. 1986. "Central Problems in the Management of Innovation." *Institute for Operations Research and the Management Sciences* 32(5):590–607.

Verein der Deutschen Ingenieure. 2004. *Entwicklungsmethodik Für Mechatronische Systeme -- Design Methodology for Mechatronic Systems -- VDI 2206*.

Warniez, Aude. 2015. "Thesis: Métriques D'intégration Pour Le Choix D'architectures Dans La Conception Des Systèmes Mécatroniques." Ecole Centrale Paris. Retrieved (<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01223145>).

Warniez, Aude, Olivia Penas, and Thierry Soriano. 2011. "Application D'une Métrique Pour La Conception Mécatronique et Son Implémentation Dans SysML." in *20ème congrès français de Mécanique*.

Wernerfelt, Birger. 1984. "A Resource-Based View of the Firm." *Strategic Management Journal* 5(2):171–80.

Williamson, Oliver E. 1975. "Market and Hierarchies: Analysis and Antitrust Implications." Williamson, O.E. (1975), *Markets and Hierarchies*: Free Press, a division of Macmillan, Inc., New York.

Wirtz, Bernd W. 2016. *Business Model*. Retrieved (<http://oxforddictionaries.com/definition/business+model?q=business+model>).

Womack, J. P., D. T. Jones, and D. Roos. 1990. *The Machine That Changed The World: How Lean Production Revolutionized the Global Car Wars*. Retrieved (https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=_n5qRfaNv9AC&oi=fnd&pg=PR7&dq=the+machine+that+chnge+d+the+world+woomack+jones+roos++1990&ots=crapl9MJx9&sig=QR9qw_QAWbq2BQbFjeRtl1TK1z8#v=onepage&q=the+machine+that+chnge+d+the+world+woomack+jones+roos+1990&f=false).

Yin, R. K. 2014. *Case Study Research: Design and Methods*. 5th editio.

Thousand Oaks, California: Sage.

Zhang, Y. and J. K. Gershenson. 2003. "An Initial Study of Direct Relationships between Life-Cycle Modularity and Life-Cycle Cost." *Concurrent Engineering : Research and Applications* 11(2):121–28.

Annexes

Annexe 1 - Extrait du fichier Excel pour l'affichage des activités des entreprises à forte activité mécatronique

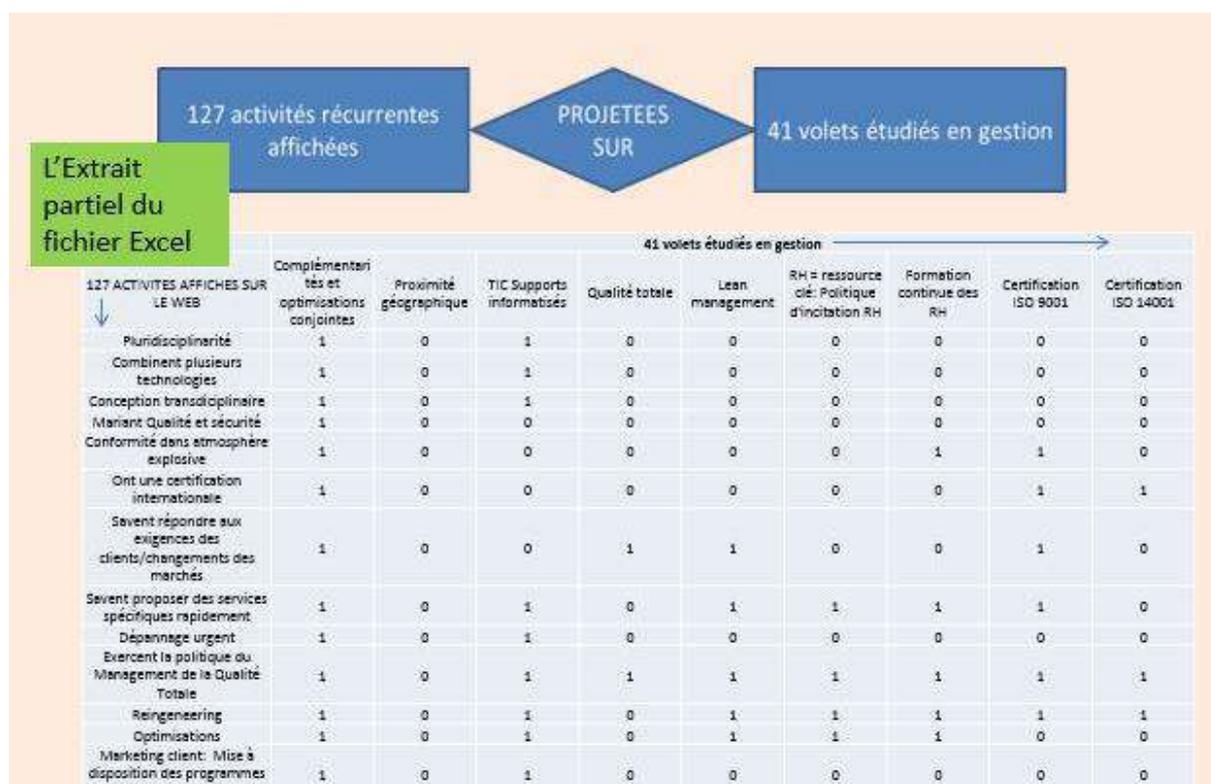


Tableau 64 : L'affichage des activités des « entreprises à forte maturité dans le domaine mécatronique »

Complémentarités et optimisations conjointes	Proximité géographique	TIC Supports informatisés	Qualité totale	Lean management	RH = ressource clé: Politique d'incitation RH	Formation continue des RH	Certification ISO 9001	
Certification ISO 14001	Certification ISO 18001	Fiabilité	Maintenance réduite	RH hautement qualifiés aux compétences transversales	Dynamiques d'accompagnement et RH hautement qualifiés	Management par la demande	Equipes interdisciplinaires INTERNES	
Communication verticale	Communication transversale	Management participatif	Innovation continue	Collaboration avec les écoles et organismes publics	Innovation de rupture	R&D	Bureau d'études et laboratoires de recherche	
Stratégie de diversification	Stratégie de spécialisation	Intégration client (partenariat)	Intégration sous-traitant	Planification stratégique avec accent mis sur couple coût/qualité	Gouvernance stratégique à coordination transversale	Veille stratégique et management de connaissances	Production tirée	
Intégration produit	Amélioration continue (produits et services)	Services (y compris gestion de projet pour tiers)	Conception transdisciplinaire	Optimisations produits	Equipements modernes et flexibles à faible coût de changements	Faibles stocks	Marketing ciblé et très segmenté	Logique de fonctionnement basée sur la flexibilité

Tableau 65 : Détail : Les 41 volets thématiques en théorie des organisations repérés

Annexe 2 - Les 5 configurations organisationnelles de Mintzberg

Caractéristiques des 5 structures organisationnelles types					
5 STRUCTURES TYPES (ou idéalisées)	SIMPLE (peu élaboré)	MECANISTE (intégrée)	BUREAUCRATIE CENTRALISEE (éducation, santé)	LA CONFIGURATION PROFESSIONNELLE (Centre de profit)	Adhocratie
EXEMPLES	Edel Temp (aussi adhocratique mais tend vers la standardisation = vers la bureaucratisation	Assembleurs, production de masse, industrie textile	Hôpitaux, firmes comptables, artisanat, agence de travail social, écoles, universités, les assurances, téléphonie, agences gouvernementales	Wrigley, General Motors, TNSNR, Schneider electric	BE, RECHERCHE (INDEEP) En partie EDEL TEMP
COMPOSANTES DE BASE					
Sommet stratégique (gouvernance, conseil)	au cœur du système	délègue un peu	composé de professionnels	siège	recours à l'ajustement mutuel
La technostructure (Travail d'analystes pour adapter l'entreprise à l'environnement)	peu ou inexistante	au cœur du système	peu	peu nombreux et au siège	au cœur du système
Les cadres intermédiaires (opérationnels chargés d'animer les équipes)	peu nombreux	ont un pouvoir certain	peu	au cœur du système	présents partout
Les services de soutien (logistique, achats, vente, marketing, communication, juridique)	faible ou inexistant	sont assez représentés et groupés	au cœur du système (les professionnels)	peu nombreux et au siège	en liaison avec le cœur
Le centre opérationnel (personnels chargé de production et maintenance)	maîtrisent souvent un seul processus	important	peu	important	en liaison avec le cœur
5 STRUCTURES TYPES (ou idéalisées)	SIMPLE (peu élaboré)	MECANISTE (intégrée)	BUREAUCRATIE CENTRALISEE (éducation, santé)	LA CONFIGURATION PROFESSIONNELLE (Centre de profit)	Adhocratie
MECANISMES de DE COORDINATION	Supervision directe	Standardisation des processus de travail	Standardisation des connaissances	Standardisation des résultats (gestion par objectifs)	Ajustement mutuel
Paramètres de conception d'une architecture organisationnelle					
Spécialisation du travail					
horizontale	faible	grande	grande	répartie entre Centre de profit et Siège	grande
MECANISMES de DE COORDINATION	grande	grande	faible	répartie entre Centre de profit et Siège	faible
Formation	faible	faible	grande	quelques managers par centre de profit	est variable
Endoctrinement par formation initiale	faible	faible	grande (formation continue)	quelques managers	est variable
Formalisation du comportement	faible	grande	faible	grande à l'intérieur des centres de profit	faible
Bureaucratique ou Organique	organique	bureaucratique	bureaucratique	bureaucratique	organique
Regroupement en unités (en fonction du savoir-faire ou de réponse au marché)	en fonction du savoir-faire	en fonction du savoir-faire	en fonction du savoir faire et de réponse au marché	en fonction du marché	en fonction du savoir faire et du marché
La taille de l'unité (plus le travail se spécialise et plus la création d'unités est justifiée)	grande	grande (entre Siège et CP)	grande à la base (étroite ailleurs)	grande à la base (étroite ailleurs)	petites (partout)
Planification et contrôle	peu	planification de actions (opérationnalisation)	peu	contrôle de performance	peu de planification d'actions (surtout en administration adhocrative)
Dispositifs de liaison (flux informationnels)	peu nombreux	peu nombreux	quelques administratifs	peu nombreux	présents partout
Décentralisation (partage du pouvoir)	centralisation (Gardé au sommet stratégique)	décentralisation horizontale limitée = sélective (Partagé entre le sommet et la technostructure)	décentraliation horizontale et verticale (pouvoir porté par le centre opérationnel)	décentralisation verticale limitée = parallèle (Partagé entre le sommet, en partie technostructure et cadres intermédiaires)	décentralisation sélective (Partagé entre le sommet et la technostructure)
Facteurs de contingence					
Age	jeunes	âgées	variable	âgées	jeunes (ad exploit)
Taille	petite	grande	variable	très grandes	variable
Système technique					
régulation (dispositifs de régulation technique pour routiniser le travail)	faible	grande	faible	grande	faible
complexité	faible	faible	faible	faible	faible ou grande (présente dan les deux formes)
automatisation	absence	absence	absence	absence	absence ou au contraire grande (les deux formes)
Environnement					
complexité	faible	faible	grande	faible	grande
dynamique	grande	faible	faible	faible (marchés diversifiés)	grande (parfois disparte)
Pouvoir					
concentration	au sommet	technostructure, souvent externe	des professionnels	les cadres intermédiaires	experts
est modulable	non	non	oui	oui	particulièrement

Tableau 66 : Caractéristiques des 5 structures organisationnelle type, traduit de Mintzberg (Mintzberg 1980): « Five Structural Configurations »

Terminologie Mintzberg : Design Parameters	Traduction et remaniement : AM (Attributs organisationnels de Mintzberg)	Correspondances entre I II
Specialization of jobs H/V		
vertical	Autonomie des travailleurs	I)Savoir-être important
horizontal	Implication des Spécialistes, Analystes	I)capitalisation des connaissances
Training	Poids de la formation initiale sur l'ensemble	I) capitalisation des connaissances
Idoctrination	Formation continue : mis avec RSE	I) capitalisation des connaissances
Formalization of behaviour	Standardisation des flux de travail	I) Savoir-faire complexe
Bureaucratic/organic	Forme organique (Organisation matricielle proposée en VARL)	
Grouping		
functional	Orientation opérationnelle/Volumes	
market	Orientation marchés	I) Offre de produits assortite de services
	Orientation systémique (quand on sait tout faire)	I) Offre de produits assortite de services
Unit size	Spécialisation en unités disciplinaires	I) Savoir-faire complexe
Planing & control systems	VA, s'agrège avec EC Système technique/régulation	I) 4 métiers mécatroniques
Action planning	Réponse par la planification des actions: mis avec Réponse à la complexité environnementale	
Performance control	Contrôle de performance: mis avec Réponse à la complexité environnementale	
Liaison devices	Flux transversaux (Organisation matricielle proposée en VARL)	I) Savoir-faire important
	Fonctionnement par groupes de projet	
Decentralization	Compris dans Autonomie des travailleurs	
Contingency factors	EC	
Age	Age	
Size	Taille	
Technical system		
regulation		
	Planification : mis avec Réponse à la complexité environnementale	
	Contrôle de performance: mis avec Réponse à la complexité environnementale	
complexity	Mélange de technologies	I) 4 métiers mécatroniques
automated	Automatisation du système technique	I) Savoir-faire complexe
	Robotisation	I) Savoir-faire complexe
Environment	EC	
complexity	Réactivité à la complexité de l'environnement	I) Adaptation forte à l'environnement
dynamism	Réactivité au dynamisme de l'environnement	I) Innovation par Open contribution
Power	Compris dans Autonomie des travailleurs (sens : Délégation, partage du pouvoir)	
A postériori (Type 6 et 7)		
Culture/Normalization	Poids de la culture/sens de la mission (RSE)	I) Savoir-être important
No clair mechanisms	Mécanismes clairs	I) Savoir-être important

Tableau 67 : Adaptation du méta-modèle de Mintzberg au besoins de l'étude Référentiel mécatronique

Annexe 3

3.1. Le concept d'entreprise moderne et flexible

Nous proposons ce modèle, par ce que dans la littérature en gestion, cette structure organisationnelle est considérée comme étant celle qui peut tirer des avantages des effets de système.

Etant donné que les experts préconisent une approche systémique plutôt que modulaire de la mécatronique, nous le considérons utile pour aborder notre recherche. De plus, il nous semble pouvoir décrire les pratiques organisationnelles que nous observons dans l'organisation qui se dit mécatronique.

En effet, les 3 pratiques effectuées simultanément produisent un effet systémique. Les acteurs se disant mécatroniques semblent, à première vue, poursuivre au moins trois des pratiques organisationnelles relatives à l'entreprise moderne et flexible citées dans le tableau ci-dessous.

Source	LA GRAPPE DE 9 PRATIQUES DIFFERENCIATRICES CARACTERISANT LA FIRME MODERNE ET FLEXIBLE	
Milgrom, Roberts (1990)	ENTREPRISE MODERNE ET FLEXIBLE	ENTREPRISE TRADITIONNELLE
a	Production par lots et ciblé	Production d'échelle
b	Améliorations de produits et de processus fréquentes	Améliorations rares
b	Ciblage marketing et segmentation de marchés	Marketing de masse peu ciblé

d	Travailleurs hautement qualifiés aux compétences transversales	Main d'ouvre peu qualifiée
e	Gouvernance : Processus de décision décentralisés horizontaux	Gouvernance : verticale
f	Accent mis sur la qualité	Accent mis sur le volume
g	Peu de stocks	Stocks élevés
h	Grande réactivité à la demande client	Faible réactivité à la demande client
i	Intégration des fournisseurs (Confiance accordée aux fournisseurs)	Intégration de Fournisseurs inexistante ou faible

Tableau 68 : Caractéristiques du modèle d'entreprise moderne et flexible

3.2. La théorie de complémentarité des ressources

Nous proposons cette théorie parce qu'elle permet d'explicitement les liens et les interdépendances qu'il y a entre les différentes ressources et/ou pratiques de l'entreprise.

Nous avons pu relever à travers les discussions avec les experts que les entreprises mécaniques qui réussissent savent bien vivre de leurs innovations. Ce modèle nous permettra de sonder les synergies qu'elles utilisent pour y arriver.

La complémentarité au départ est comprise comme suit : deux ressources sont complémentaires lorsque le retour marginal de l'une augmente en la présence de l'autre. (1) L'on peut ainsi étudier des grappes de compétences dont l'effet synergique est soit positif soit négatif. (2) Des études empiriques ont également démontré que cette relation peut être inversée, à savoir, l'on peut étudier l'effet négatif qu'une activité (grappe d'activités) peut induire en réduisant le bénéfice marginal de l'autre (des autres). (3) D'autres études encore ont montré que les synergies entre les grappes de compétences dépendent du type de ressources utilisées.

Voici quelques exemples révélés par l'étude des organisations dites modernes et flexibles à l'aide de la théorie des complémentarités.

Sources	Exemples de Ressources testées	Complémentarités trouvées
<p>(1) Milgrom, Roberts (1995) Théorie de la complémentarité : Modèle de firme à multi-produits</p>	<p>p Prix de chaque produit</p> <p>q Nombre attendu d'améliorations/produit/période</p> <p>a Réception et temps de traitement de la commande</p> <p>b Temps de livraison</p> <p>c Coût marginal direct de production</p> <p>d Coût de design d'amélioration par produit</p> <p>e Coûts supplémentaires pour les produits nouvellement changés</p> <p>m Nombre de réglages par période</p> <p>r Probabilité de lots défectueux</p> <p>s Coût direct de réglage</p> <p>w Coût de pertes par réglage</p>	<p>COMPLEMENTARITES évidentes</p> <p>En multipliant les améliorations par réglages plus fréquents (q), les valeurs de (d) coût d'amélioration et de (e) coûts supplémentaires pour les produits nouvellement changés vont augmenter naturellement ; et inversement une plus grande efficacité dans les changements et le design technologique augmente les rendements marginaux (q) ! Autre exemple : en augmentant le nombre de réglages par période (m) on réduira par la même occasion les stocks et les retours qui sont complémentaires avec les composantes des coûts de réglage (augmentation en (s) et (w)).</p>

	n Nombre de produits	
(2) Rothaermel, Hill (2005) Risques technologi- ques : (industries multiples)	Lien entre ressources spécifiques et non spécifiques : Ressources en amont → R&D et Ressources en aval → activités liées aux marchés (vente, marketing, logistique...)	COMPLEMENTARITES moins évidentes Les innovations réussissent lorsque l'on sait combiner les deux types de ressources : on doit savoir faire et vendre les innovations et donc bien en vivre.
(3) Hess, Rothaermel (2011) Spécifique à l'industrie pharmaceuti- que	Activités (types de connaissances) liées aux mêmes/différents segments de la chaîne de valeur Exemple : (1) scientifiques champions/ordinaires et (2) alliances en aval (recherche) et en amont (vente, distribution, marketing...)	COMPLEMENTARITES moins évidentes (1) La complémentarité est positive lorsque les scientifiques champions ont un lien étroit avec l'activité spécifique de la firme. (2) Les entreprises négligeant les activités de support à la production réussissent moins bien que celles qui s'appuient fortement sur ces activités complémentaires.

Tableau 69 : Ressources testées et complémentarités trouvées

3.3. Représentation élargie de l'entreprise moderne et flexible : son système productif, managérial et stratégique, adapté de Milgrom et Roberts

Adapté de : Firme moderne et flexible (Milgrom, Roberts, 1990), appelée aussi Système de production Lean (Womack, Jones, Roos, 1990).

	Caractéristiques	Entreprise traditionnelle	Entreprise moderne et flexible
	Logiques de fonctionnement différentes	Chaîne de production uniforme, produits spécifiques, les actifs de l'entreprise sont considérés comme facilement interchangeable pouvant être achetés, l'accent est mis sur l'économie d'échelle, flux poussés et fort stockage	Basé sur la flexibilité, rapidité, économies de gamme (petites séries) privilégiant la variété, les actifs sont considérés comme spécifiques et difficilement interchangeables, les compétences sont considérées comme clés, production à flux tirés à faible stockage
SYSTEME PRODUCTIF	Type d'équipements utilisé	Equipements spécifiques non modulaires à coût de réglages élevé	Equipements flexibles à faible coût de changements de réglages
	Temps de production	Temps de production longs	Temps de production courts
	Fréquence de changement de produits	Peu fréquents	Très fréquents avec des améliorations continues de produit
	BE et R&D	Développement séquentiel au sein des R&D	Equipes de développement transversales, inter-fonctionnelles, pluridisciplinaires
	Optimisation de produits et de profits	Optimisation statique (calculée sur coûts de	Amélioration Continue

		production, de matières premières, de main d'œuvre)	(optimisation statistique et ajustée)
	Gestion de stocks	Stocks élevés	Stocks faibles
	Production	Sur stock avec faible communication en aval	Production à la demande avec communication étendue
SYSTEME MANAGERIAL	Marketing	Marketing de masse peu ciblé	Marketing ciblé très segmenté
	Norme d'embauche RH	Norme d'embauche : faible	Norme d'embauche : élevée
	Niveau de compétences requis	Travailleurs peu qualifiés	Travailleurs hautement qualifiés aux compétences transversales
	Management	Par offre	Par la demande
	Style de management	Directif	Participatif
	Communication	Verticale	Horizontale
SYSTEME STRATEGIQUE	Gouvernance Stratégie	Coordination stratégique et opérationnelle centralisée (top down)	Coordination transversale avant d'être centralisée et initiative des travailleurs encouragée
	Planification stratégique	Centralisée, hiérarchique, contrôlée, en rupture de sa partie opérationnelle	Autorégulation par accès rapide à l'information localisée
	Accent mis sur	Volume	Couple : Coût et qualité
	Transactions	Selon les lois de marchés : donneurs d'ordre et sous-traitants	Relations de long terme basées sur la confiance
	Intégration (faire ou faire-faire)	Intégration verticale préférable	Recours à la sous-traitance en intégration ou quasi-intégration

Tableau 70 : Systèmes productif, managérial et stratégique de l'entreprise moderne et flexible, adapté de Milgrom et Roberts

Annexe 4 - Postulat de la théorie des configurations organisationnelles de Mintzberg

4.1. Les caractéristiques des 5 structures organisationnelles types

Le postulat stipule que pour être efficace, l'organisation tend vers une seule configuration type où :

Une partie de l'organisation l'emporte sur les autres ;

L'organisation adopte un mécanisme de coordination unique ou prédominant ;

Un mécanisme de conception de structure (design parameter) l'emporte sur les autres ;

Un dispositif de liaison prime (création des liens latéraux de hiérarchisation) ;

Il y a un type de centralisation voire décentralisation du pouvoir.

4.2. Les composantes de base de l'organisation

Les composantes de base d'après Mintzberg sont les suivantes :

Le sommet stratégique, la technostructure, la ligne hiérarchique moyenne, le soutien fonctionnel, le noyau opérationnel et la culture.

Les fonctions des composantes de base de l'organisation et exemples de métiers

4.2.1. *Le sommet stratégique*

Fonction : Se préoccupe de la globalité de l'organisation dont :

Supervision directe, Attribution des ressources, Dissémination des informations, Règlement des conflits, Mise en place des changements, Culture, éthique

Exemple de profil de postes :

Conseil d'administration, Comité exécutif, PDG, Managers de la direction, Personnel

4.2.2. La technostructure

Fonction : Analytique éloignée du flot de travail opérationnel mais qui a un impact important sur lui dont :

- 1) Adaptation à l'environnement
- 2) Contrôle à travers la standardisation

Exemple de profil de postes :

Ad 1) Planificateurs stratégiques, Concepteurs, Experts marketing, Informaticiens, Financiers - contrôleurs de gestion,

Ad 2) Contrôle à travers la standardisation a) analystes du travail s'occupant de processus b) planificateurs et contrôleurs - budget et autres c) R&D et s'occupant des qualifications RH et R&D

4.2.3. Le soutien fonctionnel

Fonction : Il fournit un soutien à l'organisation en dehors du flot opératoire

Exemple de profil de postes : spécialistes repartis dans des services comme la logistique, achats, marketing, vente, après-vente, marketing, communication, Relations Publiques, services juridiques...

4.2.4. Ligne hiérarchique moyenne

Fonction : Relie le sommet hiérarchique au noyau opérationnel

Exemple de profil de postes : Vice-Président ou Directeur Général, Directeurs ou Responsables, Directeurs de ventes, de marketing, Directeurs d'usines ou divisions, Chefs d'atelier, autres Cadres de liaison ou opérationnels chargés d'animer les équipes

4.2.5. Noyau opérationnel

Fonction : Fournit le travail de base de l'organisation, il est directement relié à la production des biens e services

Exemple de profil de postes : personnel chargé de la production et de la maintenance, ouvriers, contremaîtres et/ou chefs d'équipes

4.2.6. Culture

Fonctions : C'est le réceptacle de la mémoire, histoire organisationnelle, des traditions, croyances, de l'identité organisationnelle et valeurs véhiculés

Est mise en pratique par la direction ou les consultants et se manifeste à travers : pratiques et culture managériales, routines, habitudes, exemple d'artefact possible : charte de valeurs organisationnelles (éthique)

A présent, continuons à détailler les attributs organisationnels qui touchent aux éléments de structuration.

4.2.7. Attributs organisationnels (éléments de structuration)

Examinons, ce qui se passe d'après le deuxième point du postulat de la théorie à savoir, lorsque l'organisation adopte un mécanisme de coordination unique ou prédominant.

Si l'on se réfère à l'influence que chaque partie de l'organisation peut avoir sur la structure, on s'aperçoit que cela repose sur plusieurs facteurs : les mécanismes de coordination et les paramètres de conception relatifs à la division du travail.

4.2.8. Les mécanismes de coordination (6)

Mintzberg désigne de mécanismes de coordination la façon dont on divise et supervise le travail.

Ainsi la (1) **supervision directe** est celle qui sera utilisée pour surveiller une main d'œuvre à faibles qualifications. La forme organisationnelle qui va avoir recours à ce

mécanisme de coordination est l'entreprise traditionnelle, à production poussée, adaptée aux environnements stables et simples. Un exemple de telle entreprise serait le décolletage traditionnel de la vallée de l'Arve.

Ce mécanisme de coordination peut être également employé dans toutes les structures de production de masse où le cycle de vie de produit a atteint le stade de grande maturité. Néanmoins ce mécanisme, même s'il est peu adapté à l'innovation, reste le mécanisme de coordination des PME.

A son antipode, nous trouverons (2) **l'ajustement mutuel** qui se caractérise par la communication informelle. La coordination des tâches est nécessaire mais ni la standardisation des résultats ni celle des processus n'est possible. C'est le mécanisme de coordination des formes adhocratiques, voire innovantes.

Entre ces deux extrêmes, nous trouverons (3) **la standardisation du processus de travail** (le contenu du travail est programmé ou spécifié) que l'on trouve dans la firme simple ou encore mécaniste fonctionnelle, (4) **la standardisation du produit** où seul le résultat du travail est spécifié ou programmé, dans la firme divisionnelle et (5) **la standardisation des compétences** où seul est spécifié le type de qualification ou formation nécessaire pour faire le travail : il convient à la firme mécaniste bureaucratique (hôpitaux, universités, recherche).

Le sixième mécanisme de coordination est celui appelé standardisation des normes. Il s'agit de recours aux chartes et bonnes pratiques comme par exemple des valeurs et croyances partagées. Ils caractérisent un 6^{ème} type d'entreprise appelée missionnaire³¹. Ce sixième processus de coordination donc est (6) **la socialisation**, l'endoctrinement des membres avec le système de croyances et valeurs partagées. Partie clé : Culture, Idéologie, Sens de mission. Elle se veut réformatrice et se caractérise par un leadership charismatique avec une mission claire, focalisée et inspiratrice.

³¹Voir aussi : Rojot (2005), Théorie des organisations, Editions Eska, 2^{ème} édition, pg.153

Un 7^{ème} type d'organisation correspond à la forme politique qui se caractérise par l'absence de tous ces mécanismes décrits plus haut. Elle fonctionne par l'adoption des modes et tendances et suit les intérêts politiques des dirigeants ou des parties prenantes.

Aussi, quand la taille augmente, un mode de supervision devient nécessaire et à partir de cette taille les organisations mélangent les 5 modes de coordination.

En conclusion, rappelons ici que toute organisation passe d'un mode de coordination à un autre et que plus le travail devient complexe et plus on a recours à l'ajustement mutuel.

A présent, étudions « les briques » qui décident de la forme et de l'architecture organisationnelle qui sera adoptée en fonction de ces éléments de structure.

4.3. Les paramètres de structuration (9 repartis en 4 groupes)³²

³² Concepts opératoires associés : 1) Division de base de travail; standardisation du contenu du travail, les systèmes de flots régulés, la standardisation des qualifications ; 2) Tous les apports de la TH classique dont concepts associés : supervision directe, la division administrative du travail, les systèmes d'autorité formelle, de flots régulés, de communication informelle, de constellations de travail; l'organigramme, l'étendue du travail ; 3) Standardisation des produits, les systèmes de flots régulés, l'ajustement mutuel, les systèmes de communication informelle, des constellation de travail et de processus de décision; 4) Division administrative du travail, les systèmes d'autorité formelle, de flots régulés de constellation de travail, de processus de décision et de communication informelle.

4.3.1. 1er groupe : Conception des postes de travail

Spécialisation des emplois (H/V sans qualification, professionnelle)

Formalisation des comportements : procédures (pour pouvoir prévoir et contrôler)

Formation et endoctrinement (par l'éducation)

4.3.2. 2ème groupe : Formation de superstructures

Regroupements en unités (plus le travail est spécialisé plus la création d'unité se justifiée)

Taille des unités (plus elles sont petites et moins on a besoin de supervision directe)

4.3.3. 3ème groupe : Conception des liaisons latérales (encourage l'ajustement mutuel)

Systèmes de planification et de contrôle (les résultats standardisés : 1) planification des actions 2) contrôle de performance.

Liaisons latérales (agents de liaison, groupes de travail, comités permanents, directeurs de fonctions transversales avec un certain pouvoir (exemple : partage de responsabilités entre 2 ou 3 managers ou unités...))

4.3.4. 4ème groupe : Systèmes de prise de décision

Décentralisation verticale (délégation) et

Déconcentration du pouvoir (donné aux analystes, activités de support, opérateurs)

Liens entre les composantes de base et les attributs (éléments de structuration)

Nous avons vu la façon dont le travail est divisé en tâches, à présent il nous incombe de voir comment ces tâches sont coordonnées entre elles. Cette partie est très complexe et très variée et dépend justement de « l'ensemble de la totalité de façons

dont le travail est accompli ». L'enquête que nous allons mener nous aidera à y voir plus clair.

D'après Mintzberg, il y a également 5 façons de centraliser, décentraliser ou déconcentrer le pouvoir. La façon dont cela se fait, renvoie encore aux 5 types principaux organisationnels.

4.4. Facteurs de contingence

Mintzberg retient ces facteurs de contingence :

Age

Taille

Le système technique (plus la technologie est difficile et plus la forme est organique)

L'environnement (plus il est dynamique et plus la tendance organique s'impose)

Le pouvoir, leadership, mode (une tendance naturelle à centraliser)

Annexe 5 - Une revue de littérature relative au concept de l'innovation

Ces concepts s'inscrivent dans l'approche dite par les ressources et les compétences ou RBV pour « Resources Based View » qui postule que l'avantage concurrentiel est généré par un mélange de ressources tangibles, comme les produits par exemple et intangibles, comme les services et les compétences managériales par exemple soutenu depuis les textes séminaux de (Penrose 1959) et (Wernerfelt 1984) et progressivement opérationnalisés y compris dans la comptabilité analytique (Lorino 2003) : Deux exemples parlants sont également le méta-modèle de Mintzberg auparavant présenté et le concept pour la définition de la chaîne de valeur de Porter, voir Figure 14. Savoir concevoir, produire et bien vendre des produits renvoie également au concept de la capacité d'absorption (Cohen and Levinthal 1990), relatif à l'acquisition, l'assimilation et à la transformation et l'exploitation de nouvelles connaissances et informations. Le précurseur du concept est Campbell (1960) et toute la littérature sur la variation, sélection, et rétention de connaissances (Lane, Koka, and Pathak 2006). Ce concept a été récemment revu par (Pavlou and El Sawy 2011) et il évolue de façon opérationnelle vers le concept d'organisations ambidextres qui savent combiner les processus de conception réputés d'être longs (R&D) avec des processus courts comme la vente (March 1991), (Tushman and O'Reilly 1996), (O'Reilly and Tushman 2004) traitant d'ambidextrie contextuelle dans (Adler 2013), (Brion, Favrebonté, and Mothe 2008) et (Gandia, Brion, and Mothe 2011). Les capacités dynamiques, quant à elles, sont la combinaison de conception, de production, de vente de produits et de services combinés à un management adapté, et sont difficilement imitables et donc compétitives (Hargadon 2002), (Hargadon and Fanelli 2002), (Barrales-Molina, Bustinza, and Gutiérrez-Gutiérrez 2012), (Srivastava and Gnyawali 2011), (Hargadon and Sutton 1997), (Majchrzak, Cooper, and Neece 2004). Le concept de l'Innovation Ouverte, quant à lui, est issu du concept de capacité d'absorption et porté par (Chesbrough 2003) qui élargit le concept en dissertant sur les nouvelles façons d'innover pour profiter pleinement des connaissances et des technologies. Etre innovant en matière de produits et de services (Adams, Bessant, and Phelps 2006), (Sallez 2012), surtout en mécatronique (Muller, Schmidt-Kretschmer, and Blessing 2007), (Mahut et al. 2015) et bien vivre de ces innovations

(Renaud and Berland 2007) est donc un objectif ambitieux et surtout pour une PME ancrée jusque-là dans une activité mono-domaine. Les principaux auteurs ayant contribué au développement de ces concepts sont synthétiquement repris dans le Tableau 71.

Auteurs	Type d'innovation					
Duncan (1976); March (1991)		Ambidextrie				
O'Reilly, Tushman (2004); Gibson, Birkinshaw (2004); Lin, Yang, Demirkan (2007); Chesbrough, Appleyard (2007)		Explorer				Exploiter
Teece, Pisano, Shuen (1997); Teece (2007); Eisenhardt, Martin (2000); Zollo, Winter (2002); Barreto (2010)		Capacités dynamiques (méta compétences)				
		Détecter	Saisir			Reconfigurer
Hargadon (2002); Hargadon, Fanelli (2002); Barrales-Molina et al. 2012; Srivastava et Gnyawali (2011); Hargadon, Sutton, (1997); Majchrzak, Cooper, et Neece (2004);	Innovation de rupture	Capacités dynamiques version méta connaissances				
		Approche traditionnelle (R&D) et non traditionnelle				
		Vaste palette de méthodes de recherche; des personnes capables de reconnaître des opportunités	Créer des contextes et des incitations qui conduisent et supportent le développement de la méta-connaissance			Des utilisateurs précoces, des « chauffeurs » ou véhiculateurs d'idées, de produits
Cohen, Levinthal (1990); Lane, Koka, Pathak (2006)		Capacité d'absorption				
		Identifier	Assimiler			Exploiter
Précurseur: Campbell (1960) (littérature sur la variation, sélection, rétention); Chesbrough (2003); Chesbrough, Schwartz (2007); Lichtenthaler (2008)		Open Innovation				
		Explorer	Retenir			Exploiter
	En interne	Capacité d'inventer (GENERER ET INTEGRER)	Capacité à transformer (GARDER EN INTERNE ET REACTIVER)			Capacité d'innover (TRANSFORMER ET COMMERCIALISER)
	En externe	Capacité d'absorption (ACQUERIR ET ASSIMILER)	Capacité de former des alliances (GARDER A L'EXTERIEUR TOUT EN SACHANT REACTIVER)			Capacité d'exporter des connaissances (IDENTIFIER ET TRANSFERER)
Manish, Gnyawali (2011); Lichtenthaler (2009); Katz, Allen (1982); Argyris, Schön (1982); Senge (2006)	En interne et en externe	Capacité à reconnaître et à déjouer les pièges de compétences par la création des contextes et des incitations qui conduisent à l'acceptation du changement	Not-invented-here (cela vient d'ailleurs) (-)	Buy-in (l'herbe est plus verte ailleurs) (-)	Not-connected-here (dans les alliances) (-)	Not-sold-here (ne pas vendre des "joyaux de la couronne") (-) Sell-out (vendre nos connaissances) (+)

Tableau 71 : Les principaux auteurs ayant contribué au développement du concept de « capacités » : d'ambidextrie, des capacités dynamiques, de la capacité d'absorption et de l'open innovation

Dans la littérature managériale, la capacité à innover est identifiée comme l'un des leviers les plus importants de la performance de l'entreprise (Mone, McKinley, and Barker 1998).

Par rapport à la problématique et le but poursuivi dans cette recherche, à savoir, identifier les leviers qui permettent à une PME d'évaluer le degré de mécatronicité de ses produits et la maturité de ses processus pour arriver à faire de la mécatronique, une définition large de l'innovation est également adoptée. Elle est donnée dans le Tableau 72. En effet, (Crossan and Apaydin 2010) font une synthèse basée sur une revue de littérature sur les innovations publiées depuis les années 1980, et préconisent un cadre d'évaluation pour les innovations organisationnelles en prenant en compte les dimensions de gouvernance (leadership) de processus de génération et de gestion d'affaires (depuis l'idée, en passant par l'innovation et jusqu'à sa commercialisation) et les leviers managériaux à la fois. Ils proposent un modèle de mesures de déterminants à prendre en compte à partir des articles sur les innovations organisationnelles visibles dans le Tableau 73 de l'Annexe. Le méta-modèle de Mintzberg qui à l'origine propose d'évaluer de façon textuelle et donc qualitative la performance de n'importe quelle entreprise, permet de prendre en compte cette dimension innovante par l'intégration des facteurs financier et technologique conjointement à l'effort managérial et social également.

Une innovation³³ est conjointement l'adoption, l'assimilation et l'exploitation d'une nouveauté à valeur ajoutée dans les sphères économiques et sociales ; c'est aussi un renouvellement de produits et l'élargissement de gamme de produits et de marchés ; c'est aussi le développement de nouvelles méthodes de production et l'établissement de nouveaux systèmes managériaux. L'innovation c'est aussi bien un processus qu'un résultat.

Tableau 72 : Définition de l'innovation par (Crossan and Apaydin 2010)

³³ *Innovation is: production or adoption, assimilation, and exploitation of a value-added novelty in economic and social spheres; renewal and enlargement of products, services, and markets; development of new methods of production; and establishment of new management systems. It is both a process and an outcome.* (Crossan and Apaydin 2010)

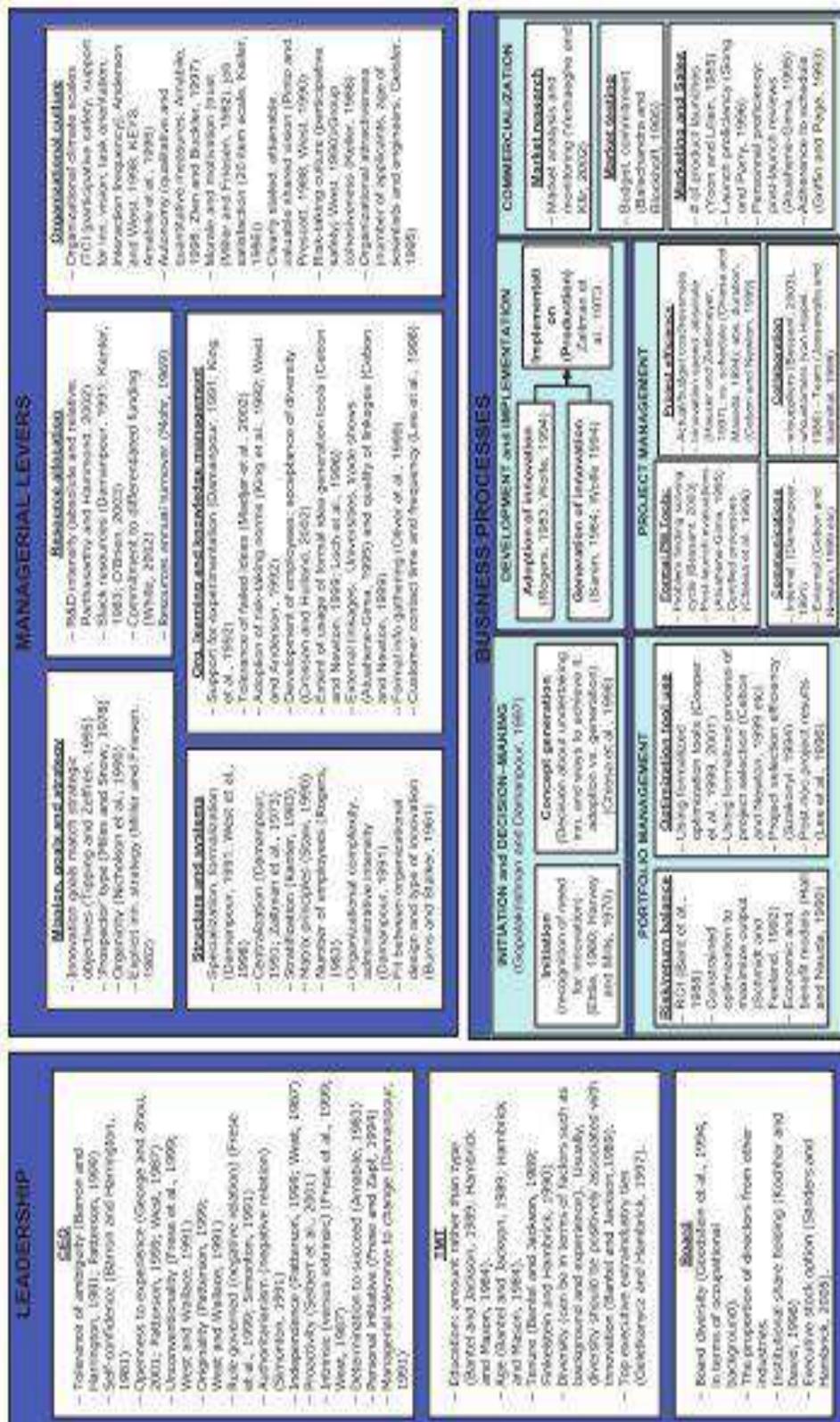


Tableau 73 : Les déterminants de l'innovation organisationnelle à prendre en compte pour la création de mesures de maturité innovante des organisations, (Crossan and Apaydin 2010) Titre original : Measurement model of the determinants of organizational innovation

Annexe 6 - Le concept d'ambidextrie plus en détail

En théorie de organisations, « savoir produire et vendre des produits innovants » oriente vers l'étude des entreprises innovantes qui savent explorer et exploiter à la fois. L'exploration (la recherche) leur permet de survivre à long terme, tandis que l'exploitation leur permet de pérenniser les innovations, autrement dit, vivre de leurs innovations et aussi de réinvestir dans la recherche. Cette double capacité d'exploration et d'exploitation s'appelle « ambidextrie³⁴ » (structurelle, contextuelle, de réseau). Les autres références relatives à l'ambidextrie se trouvent dans le Tableau 71.

A première vue, les « champions de la mécatronique » sont de taille intermédiaire ou de grande taille et pratiquent l'une des trois formes d'ambidextrie ou les trois à la fois (Exemple : Groupe SEB). Exemples : ambidextrie structurelle (le centre R&D est physiquement séparé de la partie exploitation), ambidextrie contextuelle (l'ouverture des espaces de liberté pour créer se situe à l'intérieur de l'exploitation – Exemple : Schneider Electric) ou encore l'ambidextrie de réseau (recours aux coopérations externes, savent combiner l'approvisionnement des marchés existants et créer de nouveaux marchés, savent promouvoir l'intrapreneuriat – inciter les employés à être innovants pour le compte de l'employeur) – Exemple : Coval. Quelques autres exemples d'entreprises ambidextres : Coval, Bosch Rexroth, NTN-SNR, Pack'Aéro, Poclain, Schneider Electric.

Ceci est-il envisageable pour les PME lorsque l'on sait que l'ambidextrie exige en même temps un recours aux compétences d'analyse et de contrôle tout comme aux compétences de spécialités (marketing, vente, communication) qui encouragent des collaborations et incitent aux comportements innovants.

³⁴ Duncan (1976), une référence séminale

Annexe 7 - Le concept de capacités dynamiques plus en détail

Ce concept permet d'expliciter les dynamiques de passage entre les dimensions sociale/humaine et technique voire technologique de l'organisation.

En gestion, il a permis l'opérationnalisation du concept de **veille**. Ce dernier se décompose en **la détection, l'appropriation et la reconfiguration des savoirs**. Dans ses développements récents, il a été également élargi sur l'intra-preneuriat : comportement entrepreneurial des individus pour le compte de leur entreprise.

Il est intéressant parce qu'il permet d'étudier ce que l'on appelle souvent la flexibilité ou encore l'agilité et ceci à plusieurs niveaux : organisationnel, stratégique et managérial.

Concrètement, il s'agit de détecter les opportunités sur les marchés, voir comment on pourrait en tirer profit et reconfigurer ensuite l'organisation en fonction de cette nouvelle posture si elle avait été prise.

Ces capacités sont précisément celles qui reviennent souvent lorsque les experts parlent des champions de la mécatronique en termes **d'adaptabilité face à l'environnement**.

Ces capacités dynamiques sont considérées comme des capacités META d'une organisation, difficilement imitables et présentent de ce fait un avantage concurrentiel.

CAPACITES DYNAMIQUES AU NIVEAU DES META COMPETENCES		
DETECTER	SAISIR	RECONFIGURER
L'idée de veille décrite plus finement : exploration et processus utilisant des ressources diverses; spécification des routines organisationnelles et	L'idée d'appropriation, de rétention des connaissances, des opportunités; processus d'intégration; génération et modification des routines de	L'idée de combinaison, recombinaison, reconfiguration des compétences, l'adaptation au changement; exploitation, vente de

stratégiques; détection et résolution de problèmes; analyse des opportunités et des menaces.	travail, organisationnelles et stratégiques; renforcer, recombinaison des ressources; renouveler sa base de ressources.	ressources (brevets); réagir en temps utile et en fonction des marchés.
CAPACITES DYNAMIQUES AU NIVEAU DES META CONNAISSANCES (son application pour décrire un environnement ayant généré des innovations dite de rupture)		
Utiliser une vaste palette de méthodes de recherche; avoir recours à des personnes capables de reconnaître des opportunités	Créer des contextes et des incitations qui conduisent et supportent le développement de la méta-connaissance : Exemple de Méta-connaissance: office de tri dans l'évaluation précoce des idées (trouver rapidement la crédibilité, la pertinence et l'adaptabilité d'une idée)	Trouver des utilisateurs précoces, des « chauffeurs » ou véhiculeurs d'idées, de produits - en collaboration ou en partenariat, par exemple

Tableau 74 : Caractéristiques du modèle de Capacités dynamiques

Annexe 8 - Concepts sous-jacents utilisés pour l'opérationnalisation du méta-modèle de Mintzberg

Dans cette partie les paramètres organisationnels qui permettent l'analyse de n'importe quelle organisation sont décrits. D'autres modèles sont également proposés dans le but de mieux cerner l'organisation qui se dit mécatronique. Tous mis ensemble, ils permettent l'analyse de cette dernière.

8.1. Recherche de l'exhaustivité

Il s'agit d'indicateurs opérationnels relatifs aux concepts affichés dans les titres, qui permettent de composer un questionnaire qui peut servir à la préparation des audits et enquêtes. Ils ont servi à instrumenter le méta-modèle de Mintzberg :

Ces concepts qui permettent de comprendre le phénomène observé, à savoir, l'organisation qui se dit mécatronique.

8.1.1. Concept de configurations organisationnelles

Questions relatives possibles : taille, année de création, CA, %du CA à l'exportation, pays d'exportation, type d'entreprise (BE, entreprise, laboratoire, centre technique, pôle de compétitivité, université, groupe), organigramme administratif hiérarchique, organigramme fonctionnel (flow chart), situation géographique et proximité client (filiale, siège, centre d'exploitation, division opérationnelle, siège, société commerciale, société indépendante), localisation nationale (régionale, départementale, cantonale) et étrangère, diversification (secteurs d'activité pour lesquels ils travaillent), évolution de la taille (sur les trois dernières années), services possédés en interne...

8.1.2. Concept de modèle économique (pour construire un business plan)

- Ce modèle permet d'analyser la capacité de l'entreprise à savoir vendre ses produits d'une manière efficiente, c'est-à-dire, savoir bâtir des plans qui la font bien vivre.

- Questions relatives possibles : taux de brevets déposés/brevets vendus, circuits d'achat ou de vente de brevets (achat aux laboratoires privés... publics/vente au...), taux d'investissement en R&D, questions qualitatives pour déterminer le savoir-faire en matière d'analyse de chaîne de valeur, type de comptabilité utilisés, offre de produits sur catalogue ou sur commande.

8.1.3. Concept de rupture technologique

- Nous l'utilisons pour déterminer le type d'innovations que les sociétés poursuivent.
- Questions relatives possibles : Caractéristiques des produits et des processus : type de produit (code de produit NAF, code d'activité APE FR et UE), création de nouvelles classes de produits, amélioration continue, adoption des innovations de processus et procédés, compétences organisationnelles à différents niveaux (R&D, marchés), disciplines intervenant dans la conception des produits, le niveau de complexité des produits mécatroniques (constituant, composant, produit fini).

8.1.4. Modèle d'entreprise moderne et flexible (plus en détail en Annexe 3)

- La théorie de propose 9 grappes de pratiques différenciatrices de celle de l'entreprise traditionnelle.
- Questions relatives : Type de production (poussé, tiré, par lots et ciblé), fréquence d'amélioration des produits, ciblage marketing et segmentation des marchés, niveau de qualification des RH (compétences transversales), processus de décision (présence ou absence de délégation), qualité, stocks, réactivité à la demande client...

8.1.5. La théorie d'innovation ouverte

- Cette théorie chapote les approches à l'innovation classique ainsi que plus modernes
- Questions relatives : Conception industrielle supportée par les TIC ; Modélisation de produit ; Outils PLM ; Modes d'absorption des savoirs, savoir-faire et compétences externes ; modes de veille technologique...

8.1.6. Concept de capacités dynamiques (plus en détail Annexe 7)

- Ce concept permet d'expliquer la capacité de l'organisation à capter, à intégrer et à entreprendre des changements en fonction des contraintes de l'environnement : détention de compétences statiques (savoir déjà possédés) contre dynamiques (contre savoir qu'il faudra intégrer)
- Questions associés : Fréquence d'innovations : N° de brevets/an ; Pratiques discriminantes pour l'adoption du Lean ; Marketing (stratégique) au quotidien...

8.1.7. Concept sociotechnique

- Nous l'utilisons pour introduire dans le méta-modèle la composante sociale élargie à l'environnement plus large : la RSE
- Questions relatives : taux d'investissement en formation, Satisfaction client, Détection de signaux faibles d'insatisfaction ; Représentations différentes d'une situation commune ; Styles de management ...

8.1.8. La complexité organisationnelle

Le premier est celui de la gestion de l'incertitude avec rationalité complète et incomplète, le deuxième est relatif à l'environnement qui peut être stable ou instable et homogène ou hétérogène, le troisième renvoie à la classification technologique et le quatrième, enfin, traite des types de coordination par rapport au type de technologie utilisée et la gestion des interdépendances qui en résultent.

8.1.9. La gestion de l'incertitude

Pour être efficaces, les organisations se structurent d'une certaine façon. Pour mieux comprendre cette notion, nous devrions nous attarder sur différents concepts des organisations en action (Thompson, 1967) qui nous aident à comprendre pourquoi les organisations souhaitent limiter l'incertitude.

Idéalement, toute organisation tend à limiter l'incertitude. Pourquoi ? Parce que dans un système ouvert l'organisation doit arriver à isoler son noyau technologique des influences externes. Comme cela s'avère être impossible, l'entreprise cherchera à gérer la dépendance de l'environnement et gérer les entrées (stocks tampon pour la production), sorties (amortir ou niveler les variations par les tarifs, les promotions...), gérer les tâches, trouver des sources alternatives ou encore passer par les accords.

Deux autres concepts sont liés à cette gestion de l'incertitude : la rationalité complète et incomplète.

8.1.10. Rationalité complète et incomplète

Pour optimiser la production, l'organisation tend à isoler son noyau technologique et pour cause : il exécute la tâche primaire de l'entreprise. Cette tendance à l'isoler des influences externes renvoie au concept de la rationalité complète. Tout est standardisé, contrôlable et se veut prévisible.

Le niveau managérial qui sert et contrôle le niveau technique face à l'incertitude institutionnelle, sert à l'insertion dans la société et fonctionne essentiellement sous une rationalité incomplète.

8.1.11. Typologie de l'environnement

Une représentation de typologie de l'environnement se trouve dans le Tableau 75.

Plus l'environnement est stable et homogène et plus on peut recourir aux règles et catégories auxquelles les appliquer. Un exemple parfait est la production de masse traditionnelle.

Un environnement stable mais hétérogène va pousser vers la création de sections et divisions qui vont se rapprocher des marchés diversifiés pour limiter l'incertitude. L'on va également devoir organiser le pouvoir différemment (décentralisation). Un bon exemple : les groupes avec leurs filiales.

Un environnement instable et homogène appelle à une forte planification et décentralisation du pouvoir. Exemple : fabrication moderne de produits homogènes à flux tendus.

Un environnement instable et hétérogène, lui, va pousser à la création de groupes, division et sections avec la particularité de concentrer le pouvoir différemment. Un exemple : les équipes et centres de recherche, les start-up.

ENVIRONNEMENT	HOMOGENE	HETEROGENE
STABLE	Recours aux règles et catégories auxquelles les appliquer	Création de sections, divisions auxquelles les appliquer avec décentralisation du pouvoir
INSTABLE	Lutte contre l'incertitude par l'observation, planification et décentralisation du pouvoir	Création de sections, divisions, Déconcentration du pouvoir

Tableau 75 : Typologie de l'environnement

La littérature nous dit également que le travail dans des environnements complexes et dynamiques ne peut pas être rationalisé et découpé en tâches simples ou être prédit, rendu répétitif et standardisé.

Examinons à présent l'impact suivant le type de technologies utilisé. A quel type de technologie appartient l'activité de la mécatronique ?

8.2. Types de technologies³⁵

8.2.1. Technologies à lien long

Les exemples pour les technologies à lien long sont : les aciéries, pétroliers, chaînes de montage dont la fonction est d'assurer un apport en ressources standardisée et ininterrompu. Il y a contrôle en amont et en aval du noyau technologique (intégration verticale des fournisseurs de matières premières et distributeurs).

8.2.2. Technologies médiatrices

Les exemples pour les technologies médiatrices sont des sociétés de communication, les banques ou encore les assurances. Elles créent des catégories de traitement similaire afin de diversifier les marchés qu'elles desservent et pour ne pas trop dépendre d'un seul client ou fournisseur.

8.2.3. Technologies intensives

Les exemples pour les technologies intensives sont les hôpitaux, la construction, la recherche (qui tend vers l'institution totale). Une variété de techniques est utilisée pour créer un changement dans un objet donné. Cependant le choix de techniques et de technologies dépend du retour attendu (feedback) de l'objet lui-même. Il y a donc contrôle tant de l'objet qu'elle transforme que des techniques qu'elle emploie.

Examinons à présent les interdépendances qui doivent être gérées par type de technologie.

³⁵ Source : Thompson, James D. (1967): *Organizations in action*, New York, Mc Graw Hill et Goffman, E. (1961) *Asylums*, New York, Doubleday and Co.

8.3. Types de coordination par rapport au type de technologie et leur gestion

8.3.1. Interdépendance séquentielle

Ce type de dépendance correspond aux technologies à lien long où une usine fournit les pièces à une autre pour le montage, par exemple.

8.3.2. Interdépendance en commun

Ce type de dépendance correspond aux technologies médiatrices où chaque élément apporte une contribution différente à l'ensemble. En contrepartie, chaque élément prend des ressources dont il a besoin au sein du réservoir commun. Exemple : trois unités partageant le même service marketing.

8.3.3. Interdépendance réciproque

Ce type de dépendance correspond aux technologies intensives où les produits des uns deviennent des entrées de tous les autres et vice-versa. Exemple : conception d'un nouveau produit et qui plus est mécatronique.

Toutes les entreprises présentent des interdépendances en commun. Celles qui sont plus complexes y rajoutent de l'interdépendance séquentielle ou encore l'interdépendance réciproque où les actions de chaque unité doivent être continuellement ajustées aux activités et actions des autres unités. La coordination par ajustement mutuel devient le mot d'ordre et implique la transmission d'informations nouvelles pendant le processus d'action (conception et/ou fabrication) lui-même.

8.3.4. Concept de rupture technologique

Nous faisons appel à ce concept parce qu'il nous permet de prendre une orientation dans la définition et appartenance des produits mécatroniques au niveau de la gestion.

A savoir, on parle de rupture technologique³⁶ lorsque l'avancement technologique est suffisamment important pour remplacer une ancienne technologie. Cette dernière perd de sa compétitivité malgré les efforts menés au niveau des volumes, de l'optimisation ou de l'organisation.

Les produits mécatroniques semblent refléter ces situations de rupture technologique : ils induisent de nouvelles classes de produits (robots-aspirateurs) et offrent des améliorations de produit considérables (objets connectés).

Ces situations de rupture ou de changement au niveau des processus se reflètent à travers des changements radicaux de processus de production ou encore par des améliorations apportées par des processus innovants.

Dans les développements de ce « modèle », nous pouvons trouver une typologie des ruptures technologiques par effet qu'elles produisent sur les compétences existantes de l'organisation.

Les développements les plus récents étudient empiriquement les liens et les complémentarités entre les nouvelles compétences nécessaires au développement des produits et celles nécessaires à la vente de ces produits au niveau de l'organisation.

RUPTURE TECHNOLOGIQUE		
Caractéristiques de base	Caractéristiques au niveau du produit	Caractéristiques au niveau des processus
L'ancienne technologie est remplacée	Créé de nouvelles classes de produits	Processus radicalement nouveaux

³⁶ Tushman, Anderson (1986) sur la rupture technologique ; Abernaty, Clark (1985) sur la destruction d'anciennes compétences ; Teece (1986) sur la complémentarité des ressources ; Rothaermel, Hill (2005) sur la complémentarité des ressources dans des situations de rupture technologique

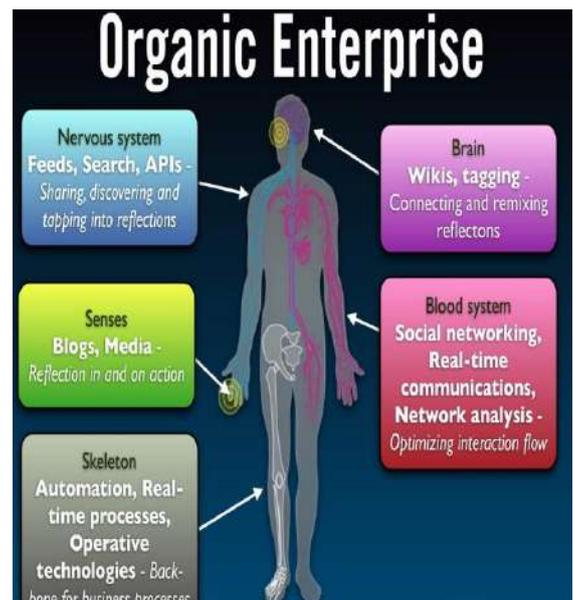
L'ancienne technologie perd en compétitivité	Apporte des améliorations considérables des produits	Processus améliorés par l'adoption des innovations de processus et procédés
DEVELOPPEMENTS		
Classification des compétences par effet qu'elles produisent sur les compétences existantes de l'organisation	Ont un effet destructeur sur les compétences organisationnelles existantes (rendent l'existant obsolète)	Ont un effet bénéfique sur les compétences organisationnelles existantes
	Nécessitent de nouvelles compétences, capacités et connaissances aussi bien en R&D que dans la production	S'appuient sur des savoir-faire existants à l'intérieur d'une classe de produits et ne rendent pas l'ancienne technologie obsolète
Comprendre les liens entre la conception - production - les activités de soutien	Compétences en amont : R&D	Compétences liées aux marchés (commercialisation, marketing, distribution, Service AV)

Tableau 76 : Caractéristiques du modèle de Rupture technologique

8.4. Le concept d'organisation organique ou dynamique et interactive

Nous avons fait appel à cette approche, parce qu'elle conceptualise la gestion des innovations et propose son opérationnalisation également.

Issue du paradigme évolutionniste comparant l'organisation à un organisme vivant qui réagit en temps réel, les « modèles » dits organiques



tentent de dépasser les limites des modèles mécanistes³⁷ ou linéaires et séquentiels pour emprunter une logique systémique. Ces modèles essaient de tenir compte des dynamiques de changements aussi bien à court qu'à long terme simultanément. A titre d'exemple, le signe distinctif majeur de stratégie conduite d'une façon organique serait la prise en compte des changements en temps réel par l'élaboration d'une stratégie d'amélioration continue et administrée à l'aide des Tableaux de Bord : une mise en évidence des liens et suivi interactif entre les différentes ressources de l'entreprise et son environnement. Ils s'appliquent cependant davantage aux ressources internes qu'externes.

Voici un exemple de déclinaison d'un tel modèle pour la gestion des connaissances : L'entreprise importe les connaissances depuis son environnement et les intègre par paliers fortement interactifs avant de les transformer en routines.

Organe	Support	Fonction
CERVEAU	Wikis, Tags (étiquetage, marquage des pages)	Se connecter à l'environnement et remixer, reformuler l'information
CIRCULATION SANGUINE	Réseaux sociaux, communication en temps réel, analyses de réseaux	Optimiser les flux informationnels

³⁷ Mécaniste: modèles de type préétabli et peu flexibles : Face à l'approche mécaniste de la stratégie vue comme « un produit que l'on peut parfaitement planifier et produire », des modèles organiques ont vu le jour. (M. Farjoun (2002), « Towards an Organic Perspective on Strategy, *Strategic Management Journal*, Vol. 23, N°. 7, pp. 561-594.

Source première: Burns, Stalker (1961);

Sources complémentaires : Chesbrough (2003); Sam Inkien : Open Innovation (2009)

SYSTEME NERVEUX	Mises à jour, recherche, APs (utilisation des interfaces de programmation des applications)	Accéder, découvrir et partager des réflexions, observations, remarques
LES ORGANES DE SENS	Blogs, médias	Détection
SQUELETTE	Routines, automatisation, processus se déroulant en temps réel, technologies opératives et d'intervention	Moteurs et piliers des processus opérationnels d'affaires

Tableau 77 : Caractéristiques du modèle Organique ou dynamique et interactif

8.5. Le concept d'innovation ouverte

Nous faisons appel à ce modèle, parce qu'il nous permet d'expliquer les liens que l'entreprise entretient avec l'environnement qui dépasse les frontières de l'entreprise proprement dite au niveau de la génération ainsi que de gestion des innovations (contrairement au modèle organique ci-dessus qui va gérer les innovations en interne).

Pour un programme d'open innovation réussi il faut veiller à un parfait équilibre entre (1) la stratégie d'entreprise, (2) les compétences organisationnelles et (3) leurs déterminants aux niveaux multiples. Il semblerait que les entreprises mécatroniques qui réussissent savent trouver cet équilibre.

Nous le proposons également parce que la grande majorité des entreprises technologiques ont aujourd'hui adopté ce modèle d'innovation. Il s'agit de l'importation et/ou de l'exportation des connaissances et ressources et de capacité de formation des alliances dans un but innovant.

Concrètement il s'agit par exemple, de recruter une personne extérieure possédant des connaissances et savoir-faire utiles à l'entreprise (cela peut être un scientifique ou un cadre d'exception ayant un parcours varié ou encore envoyer son personnel en stage chez le fournisseur. Il en est de même pour l'achat de technologies ou brevets ou inversement, de leur vente. Il peut également s'agir de l'innovation ou de conception

conjointe ou d'alliances en activités d'amont ou en aval avec des ressources extérieures à l'entreprise.

Ce modèle permet de prendre en compte ces pratiques dépassant les limites de l'organisation. Il prend la suite du concept des Capacités d'absorption tout en l'élargissant. Il a été formalisé comme suit : (les anciennes capacités communes aux deux concepts sont en rouge, la nouveauté développée en bleu clair).

Capacité d'absorption	Identifier	Assimiler	Exploiter
Open Innovation	Exploration (de connaissances)	Rétention (de connaissances)	Exploitation (de connaissances)
En interne	Capacité d'inventer	Capacité de transformer	Capacité d'innover
En externe	Capacité d'assimiler les connaissances	Capacité de former des alliances	Capacité d'exporter (disséminer) les connaissances

Les champs couverts par le modèle de l'INNOVATION OUVERTE :

La capacité à définir une vision et une stratégie d'innovation
La veille, l'écoute client, l'intelligence économique (Iconomie)
Le développement de réseaux internes et externes
Le travail collaboratif, ses règles et sa culture

La culture du risque et l'entrepreneuriat
Le développement d'outils de sélection des idées et de pilotage du portefeuille d'innovation
Le management de la propriété intellectuelle et la contractualisation de partenariats
La capacité d'absorption, c'est-à-dire la capacité à tirer profit d'idées nouvelles venues de l'extérieur

Tableau 78 : Caractéristiques du modèle d'innovation ouverte

8.6. Le concept d'iconomie (d'intelligence économique ou flux d'information)

Nous faisons appel à ce modèle, parce qu'il nous permet d'expliquer le passage de l'organisation qui gère les connaissances d'une façon traditionnelle à l'organisation qui, aujourd'hui, est considérée comme un flux d'information. Nous le proposons également parce qu'il répond aux besoins accrus de l'analyse des flux d'information en mécatronique.

Il nous permet notamment de travailler le classement par différents niveaux de connaissances (de l'idée à la création), des sources (internes, externes) et des supports physiques tels que les espaces de travail (Tableaux de Bord, Wikis, Blogs), Portails collaboratifs (intra-extranet), Réseaux sociaux, Systèmes intégrées (PLM, SAP, ORACLE)

Il est dérivé de l'Innovation Ouverte. Il présente une évolution importante quant à l'établissement et à la gestion des connaissances dont le but premier est d'assurer le flux d'informations et de connaissances.

Comparaison entre approche traditionnelle et moderne de la gestion des connaissances :

Affinage dans le temps : du traditionnel au moderne

Etapas, taches et outils selon le modèle traditionnel	
Gestion de connaissances traditionnellement confiée aux BE et ou service de R&D	La gestion des connaissances se répand dans toute l'organisation : Organisation appréhendée comme flux d'information (ICONOMETRIE)
TACHES	
Identifier les idées	CAPTAGE de l'information (pour échanges entre Utilisateurs/Clients/Fournisseurs/Consultants POUR NOTER/COMMENTER/ADAPTER/DIFFUSER
Définir/choisir les critères d'évaluation	DEPOUILLEMENT de l'information (info naturelle) : Evaluation/Organisation/Filtrage et Tri/Distribution
Faire l'étude de faisabilité	REFORMULATION de l'information (info structurée) Absorption/Combinaison/Recombinaison/Restructuration
	CREATION originale ou recombinaison de l'existant : SOURCES Invention/Interne/Externe/ Les deux
	Principe de COLLECTE ET DISSEMINATION: par les aficionados, (premiers) utilisateurs, collaboration par affinité, prosélytes
SUPPORTS DE TRAVAIL	
Supports de travail : FICHIERS	SUPPORTS : Espaces de travail (TB, Wikis, Blogs); Portails collaboratifs (intra-extranet); Réseaux sociaux; Systèmes intégrées (PLM, SAP, ORACLE)

Tableau 79 : Caractéristiques du modèle d'Iconomie

Annexe 9

9.1. Les radars de 8 modèles d'entreprise théoriques

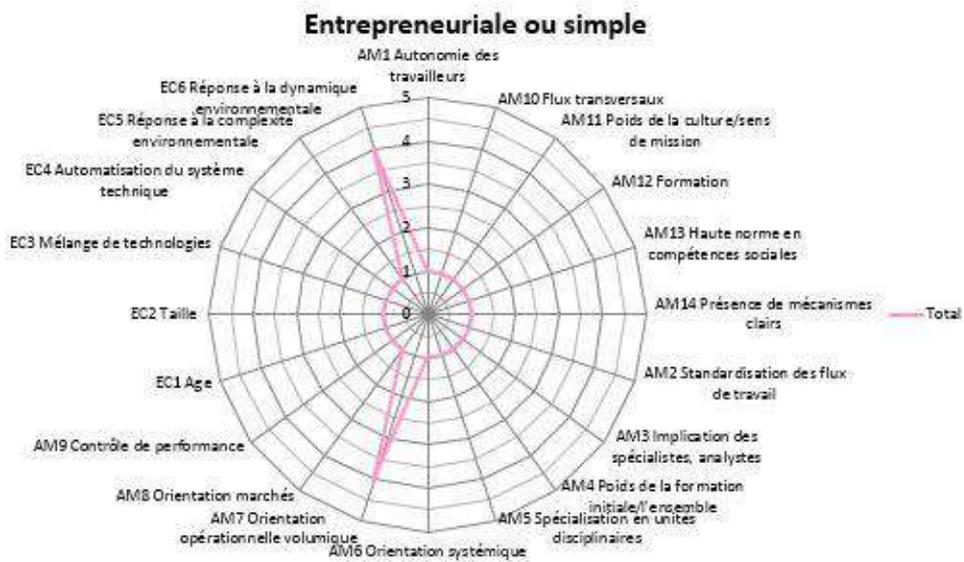


Tableau 80 : La représentation de l'entreprise Entrepreneuriale ou simple par rapport aux 20 compétences organisationnelles

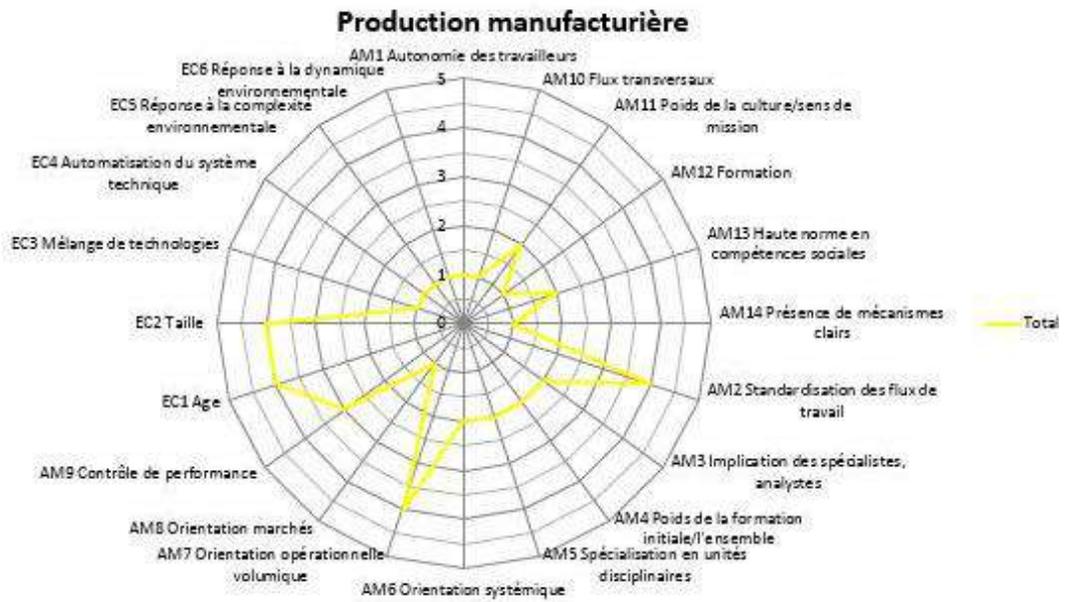


Tableau 81 : La représentation de l'entreprise de Production manufacturière par rapport aux 20 compétences organisationnelles

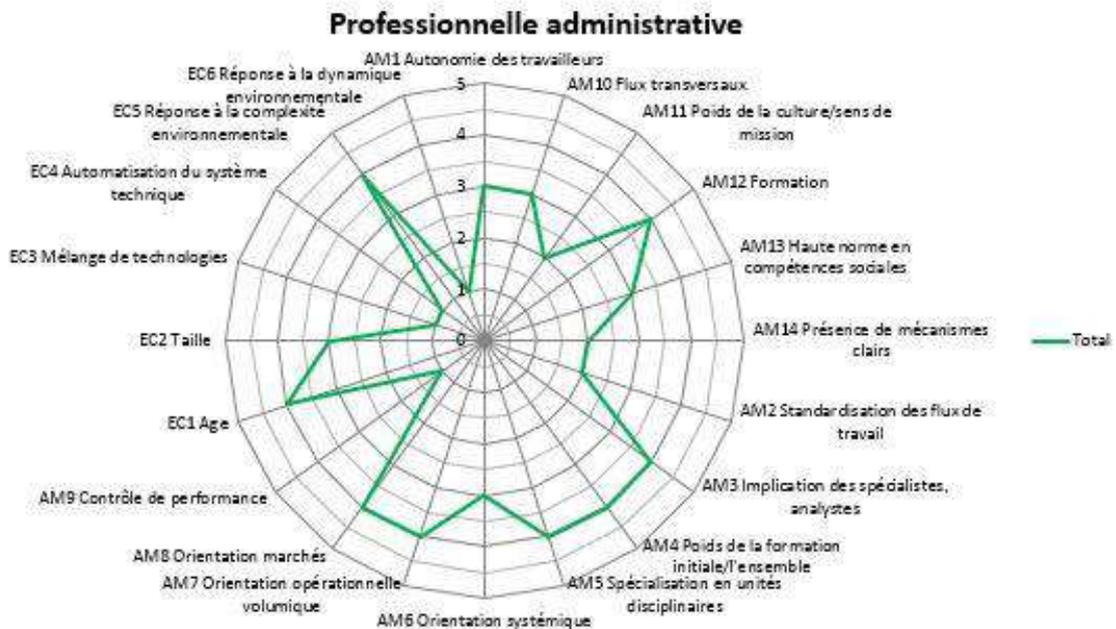


Tableau 82 La représentation de l'entreprise de l'entreprise Professionnelle administrative par rapport aux 20 compétences organisationnelles

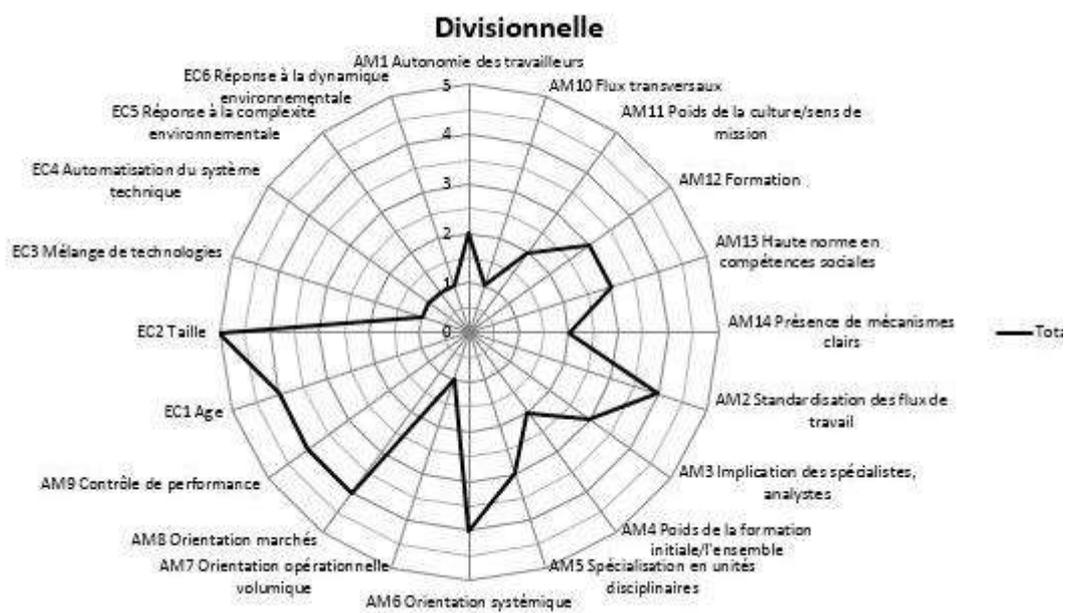


Tableau 83 : La représentation de l'entreprise Divisionnelle par rapport aux 20 compétences organisationnelles

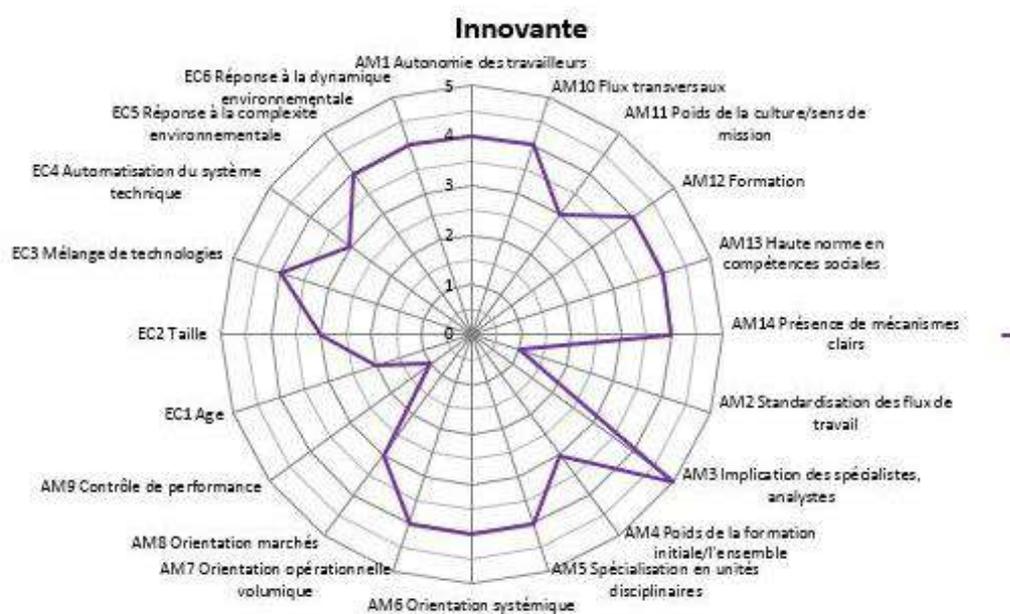


Tableau 84 : La représentation de l'entreprise Innovante par rapport aux 20 compétences organisationnelles

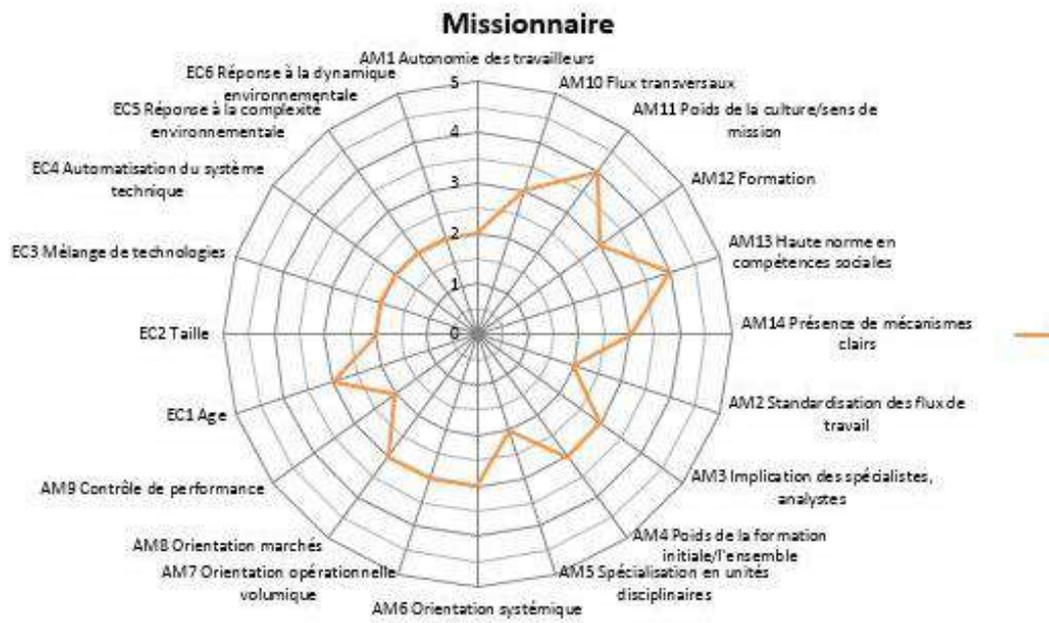


Tableau 85 : La représentation de l'entreprise Missionnaire par rapport aux 20 compétences organisationnelles

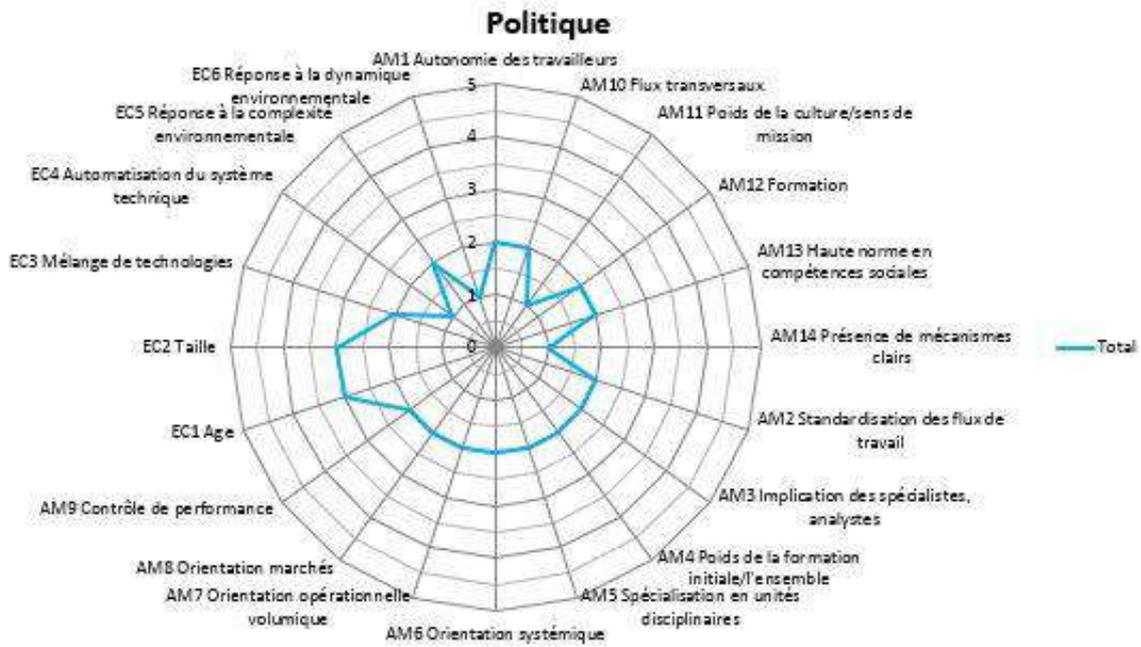


Tableau 86 : Représentation de l'entreprise Politique par rapport aux 20 compétences organisationnelles

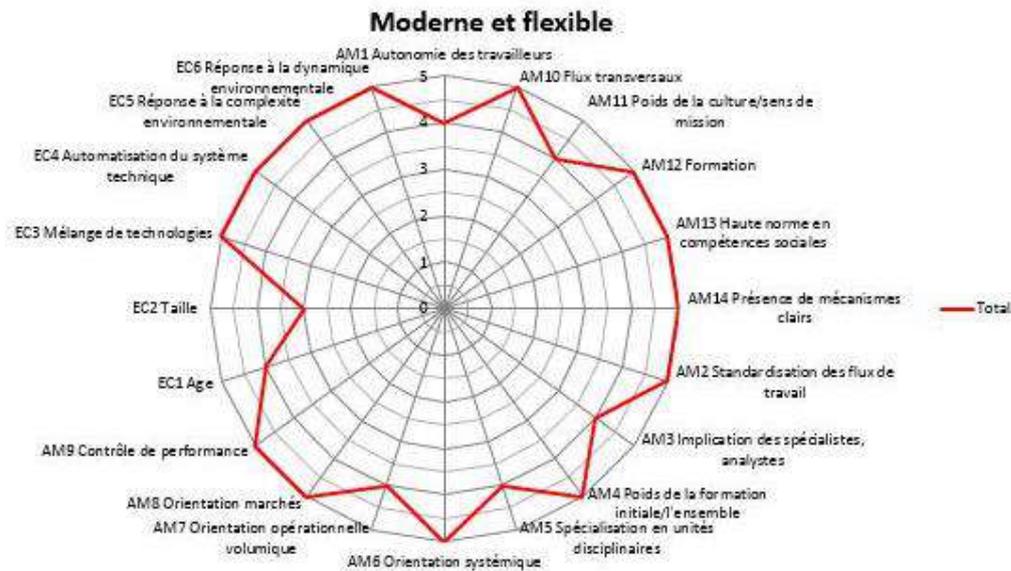


Tableau 87 : Représentation de l'entreprise moderne et flexible par rapport aux 20 compétences organisationnelles

9.2. Opérationnalisation du méta-modèle de Mintzberg

9.2.1. Contenus agrégés pour résulter en Attributs de Mintzberg et Eléments de Contingence

AM AM1 Autonomie des travailleurs: Savoir-être important 1 Management participatif et responsable

VARL Autonomie promue par la culture managériale

IND Management directif

FACT Suivi des consignes avec exactitude

FACT Donne des consignes claires et exige des résultats

FACT Sait toujours ce qu'il veut obtenir de ses collaborateurs

FACT Décide plutôt seul

FACT Cherche à faire dire aux autres ce qu'il a en tête

IND Management délégitif

FACT Implication directe et la responsabilisation

FACT Il communique avec ses collaborateurs essentiellement par e-mail

FACT Il planifie tout dans les moindres détails

FACT Il suit la progression des tâches par le biais des réunions de groupes

FACT Il fait tenir des agendas à tout le monde et veille à ce qu'ils soient respectés

IND Management persuasif ou explicatif

FACT Le dialogue

FACT	Privilégie la communication directe
FACT	Organise de réunions de suivi
FACT	Ne décide pas seul mais s'appuie toujours sur son équipe
FACT	Cherche à connaître les causes racines des problèmes
FACT	Arrive à faire adhérer les membres de l'équipe à son projet
IND	Management participatif
FACT	L'autonomie avec suivi et compagnonnage
FACT	Cultive le dialogue avec ses collaborateurs
FACT	La prise de décision se fait en équipe
FACT	La discussion est la base de toute communication
FACT	Il demande l'avis de tout le monde avant de décider
IND	Management flexible
FACT	Capacité de changer de style en fonction des environnements et besoins du moment /Questions QCM

Tableau 88 : Attribut de Mintzberg AM1 Autonomie des travailleurs représenté par la variable Autonomie promue par la culture managériale et synthétisé en tant que Savoir-être important 1 et Management participatif et responsable

AM	AM2 Standardisation des flux de travail : Savoir-faire complexe 1 Amélioration continue
VARL	Standards de gestion des flux adoptés et utilisés
IND	Procédures organisationnelles
FACT	ISO 9001
FACT	ISO 14001 (sécu travail)
FACT	ISO 14040 (analyse CyVT)

FACT	ISO 18001 (manag risque)
FACT	ISO 26000 (RSE)
VARL	Management des connaissances (community management)
IND	Systèmes intégrés d'extraction de l'information hiérarchisés
FACT	SAP
FACT	ORACLE
FACT	PLM
FACT	Autre optimisation des données d'information

Tableau 89 : Attribut de Mintzberg AM2 Standardisation des flux de travail représenté par les variables Standards de gestion des flux adoptés et Management des connaissances et synthétisé comme Savoir-faire complexe 1 et lié à l'Amélioration continue

AM	AM3 Implication des spécialistes, analystes : Capitalisation des connaissances 2 Embauche d'experts technologiques
VARL	Nombre de spécialistes par rapport à l'ensemble
IND	Haute spécialisation
FACT	Spécialistes bac+5
FACT	Ingénieurs
FACT	Docteurs

Tableau 90 : Attribut de Mintzberg AM3 Implication des spécialistes, analystes : représenté par la variable Nombre de spécialistes / ensemble et synthétisé en tant que Savoir-faire complexe 2 lié à la Capitalisation des connaissances qui nécessitent l'Embauche d'experts technologiques

AM AM4 Poids de la formation initiale/l'ensemble : Capitalisation des connaissances 1 Formation continue

VARL Norme d'embauche (Exigent des RH hautement qualifiées aux compétences techniques spécifiques)

IND Expertise technique possédée en interne

FACT Formation = ou > Bac + 3

FACT Experts en mécanique

FACT Experts en électronique

FACT Experts en informatique

FACT Experts en automatismes/adaptronique

FACT Experts en sécurité industrielle

FACT Experts en mécatronique

Tableau 91 : Attribut de Mintzberg AM4 Standardisation des connaissances représenté par la variable Norme d'embauche Poids de la formation initiale/l'ensemble synthétisée en tant que Capitalisation des connaissances 1 et pris en compte dans le calcul de la Formation continue également

AM AM5 Spécialisation en unités disciplinaires : Offre de produits assortie de services 1 Appui sur activités de soutien

VARL Expertise fonctionnelle possédée en interne

IND Services de support hautement spécialisés

FACT Marketing

FACT Services juridiques

FACT Bureau d'études

FACT Unité R&D

FACT Logistique complète

FACT	Présidence
IND	Services de support spécialisés
FACT	Ressources humaines
FACT	Achats
FACT	Vente
FACT	Après-vente
VARL	Expertise opérationnelle possédée en interne
IND	Support opérationnel spécialisé
FACT	Qualité
FACT	Méthodes
FACT	Logistique ordinaire
FACT	Achats
FACT	Maintenance
FACT	Service commercial
FACT	Comptabilité
FACT	Secrétariat
IND	Support opérationnel classique
FACT	Production
FACT	Direction

Tableau 92 Attributs de Mintzberg AM5 Spécialisation en unités disciplinaires : représentée par les variables Expertise fonctionnelle et opérationnelle possédées en interne et synthétisé en tant qu'Appui sur activités de soutien et lié à l'Offre de produits assortie de services

AM AM6 Orientation systémique : Offre de produits assortie de services 2 lié aussi à Embauche d'experts pour activités de soutien

VARL Offre de solutions complètes

IND Produits fonctionnels avec services conjoints

FACT Orientées solution complète (produits et services)

FACT Production personnalisable

Tableau 93 : Attributs de Mintzberg AM6 Orientation systémique représentée par la variable Offre de solutions complètes et synthétisée en tant qu'Offre de produits assortie de services 2 et lié à l'Embauche d'experts pour activités de soutien

AM AM7 Orientation opérationnelle volumique : Savoir-faire simple Appui sur activités de base

VARL Offre de solutions partielles

IND Offre fixe sur catalogue

FACT Produits en volumes

Tableau 94 : Attribut de Mintzberg AM7 Orientation opérationnelle volumique représentée par la variable Offre de solutions partielles synthétisé en tant que : Savoir-faire simple lié à l'Appui sur activités de base

AM AM8 Orientation marchés : Offre de produits assortie de services Appui sur activités de marchés

VARL Proximité clients

IND Filiales nationales

IND Filiales étrangères

IND Centres d'exploitation

IND Divisions opérationnelles

Tableau 95 : Attribut de Mintzberg AM8 Orientation marchés représenté par la variable Proximité clients et synthétisé en tant qu'Offre de produits assortie de service et lié à l'Appui sur activités de marchés

AM AM9 Contrôle de performance : Savoir-faire complexe 2 Comptabilité analytique, management de risques, coût total CvP

VARL Stratégie de contrôle de gestion

IND Comptabilité analytique pour assurer la qualité globale

FACT Calcul de la non qualité

FACT Cartes de contrôle et maîtrise statistique des processus

FACT Analyses Pareto

IND Analyse du coût total /cycle de vie produit

FACT Reingeneering

FACT Coût cible

IND Management du risque/Suivi des clients ECR

FACT Enquêtes clients régulières

FACT N° de contrats renouvelés /an

FACT N° de nouveaux contrats /an

FACT N° de retours clients/produit/an

FACT Temps de réponse client courts

Tableau 96 : Attribut de Mintzberg AM9 Contrôle de performance représenté par la variable stratégie de contrôle de gestion et synthétisé en tant que Savoir-faire complexe 2 lié à la Comptabilité analytique et calculé avec la variable de l'EC5 Réponse à la dynamique environnementale relative à la planification et aussi au Management de risques

AM	AM10 Flux transversaux : Savoir-faire complexe 3	Management par projet
VARL	Organisation matricielle	
IND	Fonctionnement par groupes de projet	
FACT	Bureau de Management de Projets permanents	PMO
FACT	Chefs de projet permanents	
FACT	Pilotage de projets à l'aide d'outils informatiques	
VARL	Maîtrise de la transformation numérique	
IND	Développement des réseaux sociaux	
FACT	Blogs, Fermes de blogs	
IND	Développement du travail collaboratif lié aux TI	
FACT	Blogs hiérarchisés (pubs, commentaires, archivage, catégorisation)	
FACT	V-Learning : Tixeo, environnements 3D interactifs, Openspace, I-maginer, Serious games	
FACT	Flux RSS (know-how)	
IND	Développement de l'offre de Services Numériques (sans rachats)	
FACT	Maintenance par autodiagnostic	
FACT	Commande de services ou fournitures en ligne	
FACT	Téléchargement d'applications et liens partenaires	

Tableau 97 : Attribut de Mintzberg AM10 Flux transversaux représenté par les variables Organisation matricielle et Maîtrise de la transformation numérique synthétisé par Savoir-faire complexe 3 et lié au Management par projet

AM AM11 Poids de la culture/sens de mission : Adaptation forte à l'environnement
1 Captage de solutions en mode Open Innovation

VARL Culture de RSE globale

IND Conception industrielle supporté par les outils comme PLM

FACT CAO (Conception Assistée par Ordinateur)

FACT IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur)

FACT FAO (Fabrication numérique ou Assistée par Ordinateur)

FACT Gestion des données relatives aux produits (PDM)

FACT Processus adapté à l'entité

IND Indicateurs RSE classiques

FACT Qté. de déchets recyclés par unité de produit vendu

FACT N° d'accidents de travail rapporté au secteur d'activité

FACT Emission CO/produit vendu

IND Politique de lutte contre les discriminations

FACT % Egalité de traitement H/F

FACT % de personnes handicapés dans les effectifs

IND Communautés et développement local

FACT Donations aux collectivités LOCALES

FACT Donations aux collectivités outre-mer

FACT Donations aux collectivités aux pays en développement

IND Bien-être et développement de conditions de travail

FACT Salles de sport

FACT Voyages collectifs

FACT Crèches pour le personnel

FACT Panier de fruits frais

IND Sécurité au travail

FACT Suivi des accidents du travail

FACT % d'accident du travail

FACT Procédures formalisés de sécurité au travail

Tableau 98 : Attribut de Mintzberg AM11 Poids de la culture/sens de mission représenté par la variable Culture de RSE globale calculé avec les variables de l'AM1 Autonomie promue par la culture managériale + AM12 Formation continue + AM13 Compétences sociales et Loyauté des pratiques. Elle est synthétisé par Adaptation forte à l'environnement 1 lié au Captage de solutions en mode Open Innovation

AM AM12 Formation : Capitalisation des connaissances 3 Formation continue

VARL Formation continue

IND Investissement en Formation continue

FACT Taux d'investissements dans la formation continue (Inv/CA*100) 2014 (ou Inv F/Masse salariale annuelle brute)

FACT Taux d'investissements dans la formation continue (Inv/CA*100) 2013

FACT Taux d'investissements dans la formation continue (Inv/CA*100) 2012

Tableau 99 : Attribut de Mintzberg AM12 Formation représentée par la variable Formation continue et synthétisée en tant que Capitalisation des connaissances 3 et lié à la Formation continue

AM AM13 Haute norme en compétences sociales : Savoir-être important 2
Management participatif en Conception collaborative

VARL Compétences sociales

IND Qualité des cadres dirigeants, encadrants

FACT	Engagement, expérience multivariée, compétence sociale très exprimée
FACT	Inspirer de la confiance aux membres du groupe, compétences d'analyse, de planification, d'engagement
FACT	Leadership, vision, enthousiasme, engagement et structure
FACT	Clarification des rôles
FACT	Soutien de la direction
VARL	Loyauté des pratiques
IND	Intégration fournisseurs (achats responsables)
FACT	Contrats de longue durée
FACT	Normalisation des fournisseurs
IND	Intégration clients
FACT	Contrats de co-conception
FACT	Formation de groupes de travail avec les clients
FACT	Analyse fonctionnelle des besoins client

Tableau 100 : Attribut de Mintzberg AM13 Haute norme en compétences sociales représenté par les variables Compétences sociales et Loyauté des pratiques synthétisé en tant que Savoir-être important 2 et lié au Management participatif en Conception collaborative

AM AM14 Présence de mécanismes clairs : Savoir-faire complexe 3
Management clair

MOYAM Moyenne Présence de mécanismes clairs

Tableau 101 : Attribut de Mintzberg AM14 Présence de mécanismes clairs relative à la clarification des rôles et lié au Management participatif AM1, synthétisé en tant que Savoir-faire complexe 3 Management et jugé important en Conception collaborative

EC Eléments de contingence

EC1 Age

VARM EC1 Age

IND Start up

FACT ENTRE 0 et 3 ans

IND Jeune

FACT ENTRE 4 et 9 ans

IND D'âge moyen

FACT ENTRE 10 et 19 ans

IND D'âge avancée

FACT ENTRE 20 et 29 ans

IND Ancienne

FACT 30 ans et plus

Tableau 102 : Elément de Contingence EC1 représenté par la variable Age de l'entreprise

EC Eléments de contingence

EC2 Taille

VARM Taille

IND Très petite

FACT 0 à 9

IND Faible

FACT 10 à 19 employés

IND	Moyenne
FACT	20 à 249 employés
IND	Intermédiaire
FACT	250 à 4999 employés
IND	Grande
FACT	5000 employés et +

Tableau 103 : Elément de Contingence EC2 représenté par la variable Taille de l'entreprise

EC	Eléments de contingence		
EC3	Mélange de technologies : I) 4 métiers mécatroniques	Qualification	des fournisseurs
VARM	Mélange de technologies		
IND	Produits hautement intégrés		
FACT	Adaptronique, objets communicants et adaptatifs		
FACT	Objets communicants non adaptatifs		
IND	Produits faiblement intégrés		
FACT	Objets électromécaniques non communicants		
IND	Produits non intégrés		
FACT	Objets mécaniques de précision et haute précision		

Tableau 104 : Elément de Contingence EC3 Mélange de technologies représenté par la variable de même nom et synthétisé en tant que 4 métiers mécatroniques et lié à la Qualification des fournisseurs

EC Eléments de contingence

EC4 Automatisation du système technique : I) Adaptation forte à l'environnement 2
Production et logistique modernes

VARM Automatisation du système technique

IND Equipements productifs

FACT Machines flexibles à faible temps de changement

IND Processus de production

FACT Par lots à juste temps

FACT Par flux pièce à pièce

IND Management de la production

FACT Calcul de temps d'utilisation des machines

FACT Production de quantités optimales

IND Robotisation de la production

FACT Taux de robotisation (10, 20, 30, 40, 50%)

Tableau 105 : [Elément de Contingence EC4 Automatisation du système technique](#) représenté par la variable du même nom et synthétisé en tant qu'[Adaptation forte à l'environnement 2](#) et lié à la [Production et logistique modernes](#)

EC Eléments de contingence

EC5 Réponse à la complexité environnementale : I) Savoir-faire complexe 4 Appui sur activités de soutien et Amélioration continue

VARM Réponse à la complexité de l'environnement

IND Réponse par la Planification des actions

FACT Planification des ressources ERP (Enterprise Resource Planning)

FACT Autres planifications

Tableau 106 : Elément de Contingence EC4 Réponse à la complexité environnementale représenté par la variable du même nom et synthétisé en tant que Savoir-faire complexe 4 et lié à l'Appui sur les activités de soutien et l'Amélioration continue

EC Eléments de contingence

EC6 Réponse à la dynamique environnementale : l) Innovations par Open contribution Collaborations

VARM Réponse à la dynamique de l'environnement

IND Réponse par les innovations technologiques

FACT Investissement en R&D

FACT Moyenne N° de brevets déposés/3 ans

FACT Moyenne N° de brevets commercialisés/3 ans

IND Réponse par les innovations organisationnelles

FACT LEAN

FACT Quel détail ?

IND Réponse par la recherche de collaborations externes

FACT Expertise technique accessible en collaboration

FACT Experts en mécanique

FACT Experts en électronique

FACT Experts en informatique

FACT Experts en automatisme/adaptronique

FACT Experts en sécurité industrielle

IND Collaborations avec organismes publics

FACT Universités, écoles

FACT	N° de stagiaires et alternants/an
IND	Réponse par l'absorption technologique
FACT	Brevets achetés/ 3 ans Aux laboratoires publics
FACT	Brevets achetés/ 3 ans Aux laboratoires privés
FACT	Brevets achetés/ 3 ans Aux sociétés privées
IND	Rachats de Start-Ups
FACT	N° de rachats de Start-Ups

Tableau 107 : **Élément de Contingence** EC6 Réponse à la dynamique environnementale synthétisé en tant que 1) Innovations par Open contribution et lié aux Collaborations

Annexe 10

Dans cette Annexe, les contenus des 6 grandes pratiques et 20 sous-pratiques ou grilles descriptives des pratiques mécatroniques sont disponibles.

La première grande compétence mécatronique est représentée par la R&D en mécatronique puisque les entreprises compétentes en mécatronique font des produits mécatroniques. Elle est composée de 6 sous-pratiques.

10.1. Grande pratique n° 1 : Recherche et développement en mécatronique : les entreprises mécatroniques font des produits mécatroniques

Pour devenir mécatronique, il faut organiser, en priorité, la recherche et le développement mécatronique.

10.1.1. Sous-pratique n° 1 : Conception de produits mécatroniques

Cela se traduit tout d'abord par l'intégration d'un bureau d'études mécatronique multidisciplinaire, ce qui va correspondre, dans notre référentiel, au niveau 3 ou « avancé » en mécatronique.

Quant à l'intégration, donc, elle peut également être progressive et commencer par une collaboration initiée en externe avec des laboratoires qui possèdent déjà cette compétence, avant de l'intégrer, par la suite, dans l'entreprise. Ce début de gain en compétences mécatroniques va correspondre au niveau 2 ou « débutant » en mécatronique.

La première grande pratique, la R&D en mécatronique est constitué de 6 sous-pratiques : Conception et fabrication de produits mécatroniques, Outils de modélisation multi-physiques, Support 1 : Management de compétences

mécatroniques, Support 2 : Management de projets mécatroniques, Support 3 : Marketing stratégique mécatronique, Support 4 : Outils de créativité mécatronique.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
Conception de produits mécatroniques	Conception de produits mécatroniques	Conception de produits mécatroniques	Conception de produits mécatroniques	Conception de produits mécatroniques
1 N'intègre pas de BE et ne fait pas appel aux BE en externe.	2 Sans intégrer de BE, elle fait appel aux BE privées ou universitaires en externe.	3 Intègre un BE et sait étudier la faisabilité d'un nouveau produit.	4 Intègre un BE et le service R&D commence à être élargi, commence à s'interfacer avec d'autres services que la R&D.	5 Intègre un BE dans un service R&D qui s'interfacent fortement en interne et en externe avec les collaborateurs. Les méthodes de conception sont agiles (cycle en V ou Scrum).

Tableau 108 : Sous-pratique 1 : Conception de produits mécatroniques de la grande pratique 1 : R&D en mécatronique :

10.1.2. Sous-pratique n° 2 : Outils de modélisation multi-physique adaptés à la mécatronique

Parallèlement à l'installation d'un bureau d'études multidisciplinaire donc, il faut savoir que ce bureau va devoir prévoir l'utilisation d'outils de modélisation adaptés. La conception doit pouvoir prendre en compte des contraintes relatives aux domaines mécanique et électronique d'abord et ensuite passer à l'informatique des logiciels embarqués qui dotent les produits de la capacité à communiquer. Ces outils pour la modélisation et simulation sont des logiciels multi-physiques comme Simulink ou Comsol, par exemple. D'autres logiciels de conception plus génériques sont utilisés également comme ceux de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), de modélisation comme Fabrication Assistée par l'Ordinateur (FAO), logiciels pour la gestion de données relatives aux produits Product Data Management (PDM) et logiciels de simulation Ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO).

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
Outils de modélisation multi-physiques	Outils de modélisation multi-physiques	Outils de modélisation multi-physiques	Outils de modélisation multi-physiques	Outils de modélisation multi-physiques
1 N'utilise pas d'outils de modélisation de produits tels CAO, FAO ou IAO ou de gestion de données sur les produits PDM.	2 L'entreprise réfléchit à l'utilisation d'outils de modélisation tels CAO, FAO ou IAO ou de gestion de données sur les produits PDM.	3 L'entreprise utilise quelques outils de modélisation come CAO, FAO ou IAO ou de gestion de données sur les produits PDM mais qui ne sont pas multiphysiques.	4 Utilise des outils de modélisation come CAO, FAO ou IAO ou de gestion de données sur les produits PDM et fait des simulations multiphysiques en interne ou en collaboration avec les laboratoires spécialisées quand elle ne les possède pas.	5 Intègre ou conçoit des outils de modélisation de dernières générations dont des outils de modélisation multi-physiques et lance des plateformes ouvertes pour capter et intégrer des solutions de conception. Elle recourt à ces outils par le biais de collaborations avec les laboratoires de recherche également.

Tableau 109 ::Sous-pratique 2 : Outils de modélisation multi-physiques de la grande pratique 1 : R&D en mécanique

Dans les faits, « l’aventure » mécanique commence véritablement à partir de cette étape, logée au niveau « avancé » qui s’accompagne également du recrutement du personnel adapté.

10.1.3. Sous-pratique n° 3 : Support 1 : Management de compétences mécatroniques

Pour pouvoir commencer la numérisation de produits mécanique, il faut embaucher des informaticiens capables de développer des logiciels embarqués. Leur embauche implique ensuite plusieurs contraintes, d’une part au niveau de la gestion de la conception, et d’autre part au niveau des ressources humaines et se répercute sur l’organisation toute entière.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques	SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques	SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques	SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques	SUPPORT 1 : Management de compétences mécatroniques
1 Intègre techniciens et ingénieurs en mécanique et ne fait pas de formations de sensibilisation à d'autres métiers technologiques.	2 Intègre techniciens et ingénieurs en mécanique et électronique tout au plus. Les formations de sensibilisation entre différents métiers technologiques ne sont pas assurées.	3 Intègre techniciens et ingénieurs en mécanique, électronique, fait appel à ceux en informatique. Les formations de sensibilisation entre différents métiers technologiques sont assurées ponctuellement (à l'arrivée d'un nouvel collaborateur) et informelles.	4 Intègre techniciens et ingénieurs en mécanique, électronique, programmeurs en informatique et en contrôle-commande. Les formations de sensibilisation entre différents métiers technologiques sont assurées périodiquement et portées par une seule personne (compagnonnage) tel responsables R&D.	5 Intègre techniciens et ingénieurs en mécanique, électronique, programmeurs en informatique et contrôle-commande et autres spécialités comme la thermique, l'hydraulique, le magnétisme ou de nouveaux métiers "mécatronicien" dans le rôle d'architecte produit. Les formations de sensibilisation entre différents métiers sont assurées de façon formalisée et régulières indépendamment du "turn over" et portées par le département des RH qui les organise en faisant intervenir plusieurs départements ou en intégrant toute la chaîne logistique.

Tableau 110 : Sous-pratique 3 : Support 1 : Management de compétences mécatroniques de la grande pratique 1 : R&D en mécatronique

10.1.4. Sous-pratique n° 4 : Support 2 : Management de projets mécatroniques

L'entreprise doit prévoir une transformation et apprendre à travailler en mode projet. Elle doit notamment pouvoir gérer des projets multidisciplinaires où mécaniciens, électroniciens, informaticiens et même mécatroniciens travaillent ensemble et s'interfaçent avec d'autres services de l'entreprise ainsi que clients et usagers. Cette gestion implique également des compétences en maîtrise de coûts. Progressivement, le travail en mode projet peut devenir de plus en plus formalisé. D'une façon générale, dans les entreprises ayant une grande maturité mécatronique, comme Schneider Electric, les équipes sont formées à partir des équipes de services réguliers. Une fois

en mode projet, le service qui les intègre habituellement doit se passer de leurs compétences sur toute la durée du projet, par exemple.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques	SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques	SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques	SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques	SUPPORT 2 : Management de projets mécatroniques
1 Ne sait pas travailler en mode projet.	2 Travaille sur de petits projets de temps en temps mais le personnel endosse la responsabilité supplémentaire de superviser une tâche ou un projet complémentaire.	3 L'entreprise utilise les deux modes de fonctionnement en s'appuyant sur la bonne volonté des gens mais n'a pas encore recours à un système formalisée de fonctionnement en mode projet	4 Travaille en mode projet de façon régulière et réfléchit à la formalisation de ce fonctionnement : les équipes sont multi-tâches.	Le travail en mode projet est formalisé : les équipes sont formées à partir des équipes de services réguliers et une fois en mode projet, le service qui les intègre habituellement doit se passer de leurs compétences sur toute la durée du projet.

Tableau 111 Sous-pratique 4 : Support 2 : Management de projets mécatroniques de la grande pratique 1 : R&D en mécatronique

10.1.5. Sous-pratique n° 5 : Support 3 :

Marketing stratégique mécatronique

L'entreprise doit acquérir une maîtrise de la comptabilité analytique et du pilotage par les coûts pour commencer et arriver progressivement à un stade où allouer des budgets d'innovation et de formation devient routinier. Les innovations mécatroniques peuvent faire l'objet de cession de droits de brevets au départ et de dépôt de brevets par la suite. Il est préférable qu'ils soient gérés par les services juridiques compétents, ainsi l'entreprise peut, au départ, externaliser ces services et les intégrer en évoluant si elle le juge nécessaire. Les innovations non brevetables, comme le développement des logiciels par exemple, peuvent également faire l'objet de nouvelles sources de revenus lorsqu'une bonne maturité mécatronique est atteinte.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique	SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique	SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique	SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique	SUPPORT 3 : Marketing stratégique mécatronique
1 N'a pas de comptabilité analytique ni de budget dédié au développement de nouveaux produits.	2 N'a pas de comptabilité analytique mais se met à la réalisation de premiers essais d'innovation en amélioration de produits existants et par un effort d'optimisation de ressources actuelles.	3 L'entreprise a une comptabilité analytique ce qui lui permet un pilotage par les coûts. Elle peut allouer des budgets à l'innovation par l'amélioration des produits et de la qualité. Le pilotage de brevets est confié à un cabinet spécialisé. Les brevets peuvent également être cédés au clients sur une base de royalties pour la conception.	4 Chaque projet fait objet d'un budget et d'un plan de financement propre. La comptabilité analytique et un pilotage par les coûts sont réguliers. Les budgets d'innovation sont régulièrement attribués pour l'amélioration de produits et le développement de nouveaux produits. Les innovations font l'objet de dépôt de brevets ou sont cédées et sont gérées par un service juridique compétent en externe ou interne.	5 Maîtrise la comptabilité analytique et le pilotage par les coûts, l'allocation des budgets d'innovation et de formation sont systématiques. Les innovations font l'objet de dépôt de brevets qui sont gérés par les services juridiques compétents. Les innovations non brevetables comme le développement des logiciels peut faire objet de nouvelles sources de revenus.

Tableau 112 : Sous-pratique 5 : Support 3 : Marketing stratégique mécatronique de la grande pratique 1 : R&D en mécatronique

10.1.6. Sous-pratique n°4 : Support : Outils de créativité mécatronique

L'entreprise doit accepter de faire appel aux compétences venant de l'extérieur de l'entreprise comme par exemple, des consultants et chercheurs universitaires ou privés et s'initier également aux méthodes formalisées de résolution de problèmes de conception comme par exemple la méthode TRIZ afin de stimuler la créativité des techniciens et ingénieurs. Une source de créativité sont également les ingénieurs concepteurs venant de l'extérieur de l'entreprise qui sont souvent déjà « outillés » et capables de transposer des problématiques similaires, expérimentées ailleurs, au développement de produits nouveaux.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE	R&D EN MÉCATRONIQUE
SUPPORT 4: Outils de créativité mécatroniques	SUPPORT 4: Outils de créativité mécatroniques	SUPPORT 4: Outils de créativité mécatroniques	SUPPORT 4: Outils de créativité mécatroniques	SUPPORT 4: Outils de créativité mécatroniques
1 N'a aucun recours aux nouvelles ressources et compétences ou aux méthodes de résolution de problèmes en conception.	2 La résolution de problèmes de conception repose sur l'expérience des techniciens ou ingénieurs de l'entreprise et sans faire appel aux compétences nouvelles ou à une méthode.	3 Pour la résolution de problèmes, l'entreprise embauche des techniciens ou ingénieurs venant de l'extérieur et qui sont capables de transposer des problématiques expérimentées ailleurs à la problématique de l'entreprise.	4 Les équipes d'ingénieurs sont proactives, cherchent de l'inspiration en dehors de l'entreprise et sont capables de transposer des problématiques similaires expérimentées ailleurs au développement de produits nouveaux.	5 Les équipes d'ingénieurs sont capables de transposer des problématiques similaires expérimentées ailleurs au développement de produits nouveaux. Fait appel aux consultants, chercheurs universitaires, utilise des méthodes formalisées de résolution de problèmes de conception comme TRIZ pour stimuler la créativité des techniciens et ingénieurs.

Tableau 113 : Sous-pratique 6 : Support 4 : Outils de créativité mécatronique de la grande pratique 1 : R&D en mécatronique

10.2. Grande pratique n° 2 : Veille en mécatronique

La deuxième grande pratique, la Veille mécatronique est constitué de 2 sous-pratiques : Réseaux mécatroniques et Outils de veille mécatroniques.

Afin d'organiser la recherche et le développement mécatroniques, une veille technologique doit être mise en place.

10.2.1. Sous-pratique n° 1 : Réseaux mécatroniques

Pour faire de la veille mécatronique, il ne suffit pas de se contenter de visiter les salons professionnels et d'effectuer un suivi des brevets de la concurrence, même si cela peut constituer un début. L'approche doit être beaucoup plus proactive : il convient pour cela, de se rapprocher des réseaux professionnels, tels que, par exemple, le syndicat de la mécatronique, les centres techniques ou encore des laboratoires universitaires de recherche dédiés à la mécatronique où les entreprises peuvent échanger avec des

professionnels connaissant bien la problématique de conception de systèmes multi-physiques. Intégrer des stagiaires d'écoles d'ingénieurs formés à l'électronique analogique pour commencer et à l'électronique embarquée ensuite, est une approche qui peut être envisagée. Cependant, l'entreprise doit avoir acquis, au préalable, une certaine connaissance des sujets afin de pouvoir absorber les connaissances ainsi apportées. Une fois cette transformation engagée, l'entreprise peut former des groupes de travail à l'intérieur des réseaux, contractualiser avec des laboratoires de recherche universitaires ou privés, intégrer des stagiaires d'écoles d'ingénieurs de façon systématique et formalisée, employer des docteurs et même former des réseaux avec des collègues de travail à travers le monde. Enfin, co-crée des Clubs d'entreprises dans les universités et écoles d'ingénieurs, pour les plus avancées.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE
Réseaux mécatroniques	Réseaux mécatroniques	Réseaux mécatroniques	Réseaux mécatroniques	Réseaux mécatroniques
1 Ne fait partie d'aucun réseau professionnel, ne travaille jamais avec les laboratoires universitaires de recherche et n'intègre jamais de stagiaires d'écoles d'ingénieurs ni de docteurs.	2 Fait partie d'un réseau professionnel, consulte occasionnellement des laboratoires universitaires de recherche, intègre sporadiquement des stagiaires d'écoles d'ingénieurs.	3 Fait partie d'un ou plusieurs réseaux professionnels, fait souvent appel aux laboratoires universitaires de recherche, intègre régulièrement des stagiaires d'écoles d'ingénieurs.	4 Fait partie de plusieurs réseaux professionnels, peut former des groupes de travail à l'intérieur de ces derniers, contractualise avec des laboratoires de recherche, intègre des stagiaires d'écoles d'ingénieurs de façon régulière.	5 Fait partie de nombreux réseaux professionnels, peut former des groupes de travail à l'intérieur de ces derniers, contractualise avec des laboratoires de recherche universitaires ou privés, intègre des stagiaires d'écoles d'ingénieurs de façon systématique et formalisée, emploie des docteurs, forme des réseaux avec des collègues de travail à travers le monde. Co-crée des Clubs d'entreprises dans les universités et écoles d'ingénieurs.

Tableau 114 : Sous-pratique 1 : Réseaux mécatroniques de la grande pratique 2 : Veille en mécatronique

10.2.2. Sous-pratique n° 2 : Outils de veille mécatroniques

L'entreprise candidate à la mécatronique doit pouvoir tirer tout profit qu'elle peut des outils de technologies d'information (TI). Les outils collaboratifs adaptés à la mécatronique sont par exemple les Blogs et les Wiki d'entreprise. Elle doit également s'intéresser et développer des compétences en utilisation d'outils plus sophistiqués comme ceux pour l'exploration de données relatives à l'intelligence économique (web mining) pour connaître les tendances des marchés et pour effectuer les fouilles dans sa propre base de données également. Cela permet d'avoir un suivi et d'effectuer des statistiques utiles qui peuvent intéresser l'entreprise.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE	VEILLE EN MÉCATRONIQUE
Outils de veille mécatronique	Outils de veille mécatroniques	Outils de veille mécatroniques	Outils de veille mécatroniques	Outils de veille mécatroniques
1 Ne fait pas de veille technologique ni concurrentielle.	2 Commence à faire de la veille technologique en visitant les salons professionnels, en déposant ses propres brevets et en suivant les brevets de la concurrence directe de façon informelle.	3 Fait de la veille technologique en visitant les salons professionnels, en déposant ses propres brevets, en suivant les brevets de la concurrence directe en faisant appel aux Centres d'études techniques.	4 Créé des réseaux Intranet qu'elle élargit aux réseaux extranet pour récupérer des informations des clients directs et de la sous-traitance.	5 Utilise des outils TI collaboratifs tels les Blogs, Wiki d'entreprise et développe ou capte l'innovation par le biais de plateformes collaboratives ouvertes en mode Innovation ouverte. Utilise des outils sophistiqués de datamining et d'intelligence économique.

Tableau 115 : Sous-pratique 2: Outils de veille mécatronique de la grande pratique 2 : Veille en mécatronique

10.3. Grande pratique n° 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques)

La troisième grande pratique, Identification des besoins (marchés et clients mécatroniques) est constitué de 4 sous-pratiques : Entité marketing dédiée à la mécatronique, Achats/Vente adaptés à la mécatronique, Outils de marketing adaptés à la mécatronique et Support : Formations mécatroniques.

10.3.1. Sous-pratique n° 1 : Entité marketing dédiée à la mécatronique

L'entreprise candidate, au départ, n'aura probablement pas d'entité marketing dédiée. Aussi, elle devra intégrer, progressivement, les compétences habituellement regroupées dans ce type d'entité organisationnelle. L'une des compétences clés de marketing pour la mécatronique est la définition fonctionnelle du cahier de charges notamment. Ce dernier se constitue par étapes en raison de collaboration nécessaire entre plusieurs parties prenantes et afin de respecter un coût cible préétabli. Les protocoles d'analyse de la valeur, dans les grandes lignes, sont les suivants : en partant de la saisie du besoin, l'étude de faisabilité est gérée notamment avec la R&D et la définition d'avant-projet et de développement avec la production et méthodes (composé d'étude de marché, de la réalisation de prototypes, de l'étude de l'industrialisation), passe par les premiers « clients tests » (early adopters) et débouche sur une production et mise en vente du produit. Le processus de la relation contractuelle entre le client, les concepteurs et l'entreprise est formalisé dans les entreprises qui ont une grande maturité mécatronique.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)
Entité marketing dédiée à la mécatronique	Entité marketing dédiée à la mécatronique	Entité marketing dédiée à la mécatronique	Entité marketing dédiée à la mécatronique	Entité marketing dédiée à la mécatronique
1 N'a pas de service de marketing, ne s'intéresse pas au marketing de l'innovation, ne fait pas d'analyse de marchés ou de portefeuille clients.	2 N'a pas de service marketing dédié mais quelques personnes dans l'entreprise ont des notions de marketing et s'interfaçent avec les clients, le service de vente et la conception, qui est faite en externe.	3 L'entreprise a un service de marketing composé de quelques personnes, font quelques études de marchés, traduisent le besoin de clients saisis par les services de vente en supports d'offre de produits et services, s'initient à l'analyse fonctionnelle.	4 La rédaction du Cahier de Charges Fonctionnel est formalisée par un processus écrit de l'entreprise ou fait partie intégrante de ses processus de qualité. L'entreprise sait mettre en forme le processus de développement du produit en s'interfaçant régulièrement avec les parties prenantes et en respectant les différentes étapes de développement.	5 La définition du Cahier de Charges Fonctionnel se fait par étapes pour respecter un coût cible préétabli : en partant de la saisie du besoin, l'étude de faisabilité est gérée avec la R&D, et la définition d'avant projet et de développement avec la production et méthodes (composé d'étude de marché, de la réalisation de prototypes, de l'étude de l'industrialisation) et débouche sur une production et mise en vente du produit. La relation contractuelle entre le client, les concepteurs et l'entreprise est formalisée.

Tableau 116 : Sous-pratique 1: Entité marketing dédiée à la mécatronique de la grande pratique 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques)

10.3.2. Sous-pratique n° 2 : Achats et vente adaptées à la mécatronique

Grâce à de nombreuses fonctions complémentaires offertes par les produits mécatroniques, l'entreprise peut commencer à modifier son modèle d'affaires. Tout d'abord elle peut fidéliser ses clients en élargissant sa gamme de produits de base (vente d'objets physiques) en les dotant de nouvelles fonctions (vente d'objets connectés). Cette vente de produits relatives aux produits, peut ensuite être élargie à la vente de fourniture de services liés à ces objets connectés (vente d'objet sous packaging de service – maintenance prédictive, par exemple). Ces nouveaux services pourraient également être l'exploitation de données relatives à ces objets ou encore la vente de ces données en accord avec les clients dont les produits génèrent ces données. L'entreprise peut également offrir de la consultance pour aider les

fournisseurs à monter en compétence mécatronique et peut progressivement évoluer vers une activité où elle vendrait des heures de services et non plus que les produits.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)
Achats / Vente adaptés à la mécatronique	Achats / Vente adaptés à la mécatronique	Achats / Vente adaptés à la mécatronique	Achats / Vente adaptés à la mécatronique	Achats / Vente adaptés à la mécatronique
1 Ne sait pas qualifier les besoins des clients autrement que par la réponse à un Cahier de Charges classique et non pas fonctionnel, déterminé par les donneurs d'ordre. Les clients ne sont pas fidélisés.	2 Apprend à qualifier les besoins des clients et s'initie à la rédaction d'un Cahier de Charges Fonctionnel pour répondre aux besoins de clients. Fait de la prospection classique et vend des produits peu fonctionnels. A un Service Après Vente classique. Les clients ne sont pas incités à la fidélisation.	3 Sait définir les besoins des clients. La rédaction d'un Cahier de Charges Fonctionnel est un outil maîtrisée et partagée ensuite avec les Méthodes, R&D, le Marketing et les Achats. A un service de maintenance plus évolué. Les clients sont fidélisés par l'offre complémentaire de services.	4 Sait définir les besoins des clients. La rédaction d'un Cahier de Charges Fonctionnel est un outil maîtrisée et partagée ensuite avec la les Méthodes, R&D, le Marketing et les Achats. L'entreprise propose de nouvelles gammes de produits et de services dont la maintenance prédictive, la formation et la consultance. Les clients sont fidélisés par l'offre complémentaire de services et de l'offre de gammes de produits.	5 A mis en place un processus pour la qualification des besoins des clients. La rédaction d'un Cahier de Charges Fonctionnel est un outil maîtrisée et partagée ensuite avec les départements Méthodes, R&D, le Marketing et les Achats. Utilise des techniques de prospection par le biais de plaquettes commerciales faites en CAO. L'entreprise fidélise ses clients en élargissant sa gamme de produits : en leur proposant de nouvelles fonctions relatives aux produits et aux nouveaux services dont formation, consultance et vend des heures de services et non plus que les produits.

Tableau 117 : Sous-pratique 2: Achats/Vente adaptés à la mécatronique de la grande pratique 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques)

10.3.3. Sous-pratique n° 3 : Outils de marketing adaptés à la mécatronique

L'analyse des besoins fonctionnels des clients est essentielle pour réussir dans la mécatronique. Ainsi, la rédaction d'un cahier de charges fonctionnel (CdCF) doit devenir un outil maîtrisé et partagé (commun) avec les départements Méthodes, R&D, Achats et Vente et rentrer éventuellement dans un processus de définition de qualité managériale. Quant aux techniques de prospection, elles peuvent s'inspirer du

marketing en innovation ; concrètement, l'on peut distribuer aux clients des plaquettes commerciales faites en CAO pour les faire réagir et voir si les solutions envisagées trouvent preneur. Progressivement, le cahier de charges fonctionnel (CdCF) peut être intégré dans les outils de gestion des ressources tels ERP ou PLM (les applicatifs logiciels commerciaux étant par exemple SAP, ORACLE, WINDCHILL, AUDROS et autres) ; arrivant à ce stade, le processus est bien maîtrisé.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)
Outils de marketing adaptés à la mécatronique	Outils de marketing adaptés à la mécatronique	Outils de marketing adaptés à la mécatronique	Outils de marketing adaptés à la mécatronique	Outils de marketing adaptés à la mécatronique
1 N'a pas d'outil pour qualifier un besoin.	2 S'initie à l'analyse de besoins de clients en version papier.	3 Traduit les besoins de clients en fonctions d'usage et sait rédiger Cahier de Charges Fonctionnel à l'aide d'un Tableau de Bord en Excel.	4 La rédaction d'un Cahier de Charges Fonctionnel se fait à l'aide d'un Tableau de Bord lié à un outil informatique comme ERP. Les documents de prévente sont faits en CAO comme supports pour qualifier le besoin de clients.	5 L'entreprise intègre le Cahier de Charges Fonctionnel qui est maîtrisé dans des outils de gestion des ressources tels SAP, ORACLE, PLM.

Tableau 118 : Sous-pratique 3: Outils de marketing adaptés à la mécatronique de la grande pratique 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques)

10.3.4. Sous-pratique n° 4 : Support : Formations mécatroniques

Cette sous-pratique doit assurer à l'entreprise un passage réussi de la vente de produits monofonctionnels aux produits multifonctionnels et de services. Les formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente doivent devenir aussi vite que possible des pratiques courantes ou standardisées. Les services de Ressources Humaines, de R&D, des Achats et de Vente doivent s'assurer que les vendeurs maîtrisent la structure des coûts, et les formations de sensibilisation aux problématiques entre différents domaines, notamment aux méthodes de travail, doivent également être mises en place. Idéalement, il faut arriver à standardiser le

processus d'établissement des coûts cibles, le marketing d'innovation pratiqué au sein du BE ou de la R&D doit s'interfacer avec le marketing stratégique organisationnel pour répandre les meilleures pratiques à l'organisation toute entière. Tout ceci facilitera le passage d'un niveau de maturité à l'autre pour arriver à un démarrage du cycle de nouveaux produits régulier ou tous les 3 ans en dehors de détection de commandes plus spécifiques, par exemple.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)	IDENTIFICATION DES BESOINS (Marchés et clients)
SUPPORT : Formations mécatroniques	SUPPORT : Formations mécatroniques	SUPPORT : Formations mécatroniques	SUPPORT : Formations mécatroniques	SUPPORT : Formations mécatroniques
1 Il n'y a pas de formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente, les vendeurs ne savent pas structurer les coûts, la comptabilité est classique et la vente se fait au marges liées aux marchés matures (au kg).	2 Il n'y a pas de formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente. Les vendeurs sont proactifs et commencent à structurer les coûts. On vend toujours un produit faiblement fonctionnel.	3 Les formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente sont informatives, les vendeurs sont proactifs et commencent à structurer les coûts, savent établir les coûts cibles et démarrer le cycle de nouveaux produits tous les 3 ans.	4 Les formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente sont informatives, les vendeurs sont proactifs et commencent à structurer les coûts, savent établir les coûts cibles et démarrer le cycle de nouveaux produits tous les 3 ans.	5 Les formations relatives aux nouveaux produits pour les forces d'achat et de vente sont standardisées et en lien avec le service RH, les vendeurs maîtrisent la structure des coûts, le processus d'établissement des coûts cibles est standardisé, le marketing d'innovation s'interface avec le marketing stratégique et le démarrage du cycle de nouveaux produits se fait régulièrement ou tous les 3 ans en dehors de détection de commandes plus spécifiques.

Tableau 119 : Sous-pratique 4 : Support : Formations mécatroniques de la grande pratique 3 : Identification des besoins (Marchés et clients mécatroniques)

10.4. Grande pratique n° 4 : Industrialisation en mécatronique

La quatrième grande pratique, Industrialisation en mécatronique, est constitué de 3 sous-pratiques : Equipements productifs adaptés à la mécatronique, Outils PLM et Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité).

Les produits mécatroniques sont des produits qui nécessitent le lancement de petites séries, surtout lorsqu'ils sont faits sur commande spécifique. Le parc de production doit donc être adapté à la production de séries réduites.

10.4.1. Sous-pratique n° 1 : Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique

Pour s'engager dans la mécatronique, l'entreprise candidate doit passer d'un parc de machines traditionnel à un parc de production plus moderne. A savoir, des machines modernes et flexibles qui peuvent être modifiées rapidement pour le lancement de petites séries. Ceci dit, le parc de production dont l'entreprise se sert actuellement pour assurer une production de masse dite aussi « à volumes » peut être renouvelé progressivement. Si l'entreprise vise évoluer vers « l'usine 4.0 » elle va certainement avoir l'ambition de robotiser en partie sa production (robotique et cobotique).

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE
Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique	Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique	Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique	Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique	Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique
1 L'entreprise a un parc de production ancien.	2 A un parc de production ancien avec quelques nouvelles machines, non adapté aux flux tendus.	3 Commence à renouveler son parc de machines de production pour rendre la production adaptée à la fabrication de petites séries.	4 L'entreprise a des machines modernes et flexibles qui peuvent être modifiées rapidement pour le lancement de petites séries.	5 A des machines modernes et flexibles qui peuvent être modifiées rapidement pour le lancement de petites séries. Une partie de sa chaîne de production est robotisée (robotique et cobotique).

Tableau 120 : Sous-pratique 1 : Equipements productifs adaptés à la fabrication mécatronique de la grande pratique 4 : Industrialisation en mécatronique

10.4.2. Sous-pratique n° 2 : Outils PLM

Idéalement, si la décision de s'engager dans la mécatronique est prise, il est souhaitable de se doter dès le départ des outils de gestion de cycle de vie de produits

(PLM) qui rendent possible les liaisons entre toutes les activités de l'entreprise en partant des activités du bureau d'études ou de la R&D et en passant par toutes les parties prenantes dans le processus de création, de fabrication et de vente de produits mécatroniques, comme vu préalablement dans les outils de modélisation multi-physique et outils de marketing. Il s'agit des logiciels de gestion de la production comme Product Data Management, de la gestion des RH et de ceux de l'intelligence économique comme les Blogs, Wiki et au-delà des limites de l'entreprise, peuvent intégrer, dans les développements futurs, des réseaux et plateformes centralisés et ouvertes à l'extérieur.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE
Outils PLM	Outils PLM	Outils PLM	Outils PLM	Outils PLM
1 N'a pas d'outil de suivi de production spécifique.	2 N'a pas d'outil de Product Data Management.	3 Intègre un produit de suivi de production	4 Intègre un outil de PLM pour la gestion de données sur les produits tel Product Data Management qui relie les activités de la R&D, Logistique, Vente.	5 Intègre un outil de PLM qui relie toutes les activités de l'entreprise et au-delà de ses limites, les réseaux dont les activités de R&D, Logistique et Vente, de production comme Product Data Management, la gestion des RH et Blogs, Wiki et plateformes ouvertes sont centralisés et ouvertes à l'extérieur.

Tableau 121 : Sous-pratique 2 : Outils PLM de la grande pratique 4 : Industrialisation en mécatronique

10.4.3. Sous-pratique n° 3 : Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)

En tant que candidates à la mécatronique, les entreprises doivent être conscientes du fait que les donneurs d'ordres utilisent des processus exigeants de qualification pour s'assurer de la qualité finale de leurs produits. Ces entreprises qualifient leurs

fournisseurs en fonction de leur capacité à répondre aux exigences très pointues de leurs propres processus formalisés, surtout au niveau des tests à effectuer sur les différentes phases de la conception du produit. Ces exigences peuvent aller jusqu'à demander à l'entreprise de changer son fournisseur à elle et le remplacer par un autre auquel le donneur d'ordre a plus confiance.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE	INDUSTRIALISATION EN MÉCATRONIQUE
Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)	Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)	Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)	Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)	Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité)
1 Ne qualifie pas ses fournisseurs.	2 Ne qualifie pas ses fournisseurs.	3 Commence à qualifier ses fournisseurs en fonction de leur capacité à assurer la qualité par rapport aux besoins ponctuels.	4 Qualifie ses fournisseurs en fonction de leur capacité à assurer la qualité par rapport à un Cahier de Charges formalisé du produit.	5 Qualifie ses fournisseurs en fonction de leur capacité à répondre aux exigences très pointues de ses propres processus formalisés, surtout au niveau des test à effectuer sur les différentes phases de la conception du produit. Elle établit un cahier de charges formalisé de qualification de fournisseurs.

Tableau 122 : Sous-pratique 3 : Activités de support (qualification des fournisseurs par rapport à la qualité).de la grande pratique 4 : Industrialisation en mécatronique

10.5. Grande pratique n° 5 : Méthodes en mécatronique

10.5.1. Sous-pratique n° 1 : Méthodes et tests de qualité mécatroniques

La cinquième grande pratique, Méthodes en mécatronique, est constitué de 3 sous-pratiques : Méthodes et tests de qualité mécatroniques, Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique et les Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique.

Une entreprise candidate doit pouvoir développer des méthodes de conception agiles ce qui veut dire, dans la pratique, d'effectuer de nombreux allers-retours entre les clients, les concepteurs et les services concernés : méthodes, production, logistique, achats, vente. Les méthodes les mieux adaptées à la conception et production mécatronique est celle en V mais également la méthode agile qui s'apparente encore le plus à la méthode SCRUM, issue du milieu de conception de logiciels. Ces tests à effectuer sur les différentes phases de la conception du produit exigent donc la prise en compte de nombreuses contraintes en conception que sont la dissipation dans les systèmes chauffants, la gestion d'énergie pour une optimisation de la consommation, la communication pour la gestion des infrastructures de réseaux de stockage, la gestion des données pour l'exploitation de grandes quantités de données fournies par les systèmes mécatroniques installés. En tant que candidate à la mécatronique, il faut se préparer à pouvoir absorber toutes ces compétences afin de pouvoir les formuler de façon utile aux différentes parties prenantes.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE
Méthodes et tests de qualité mécatroniques	Méthodes et tests de qualité mécatroniques	Méthodes et tests de qualité mécatroniques	Méthodes et tests de qualité mécatroniques	Méthodes et tests de qualité mécatroniques
1 N'a pas élaboré de méthodes de travail spécifiques par rapport au développement de produits et ne suit aucune norme de façon rigoureuse, n'applique pas de tests de qualité.	2 L'entreprise a élaboré quelques méthodes de travail spécifiques par rapport au développement de produits, suit quelques normes en appliquant quelques tests de qualité de façon aléatoire et minimaliste, s'initie à la prise en compte de nombreuses contraintes en conception de systèmes mécatroniques.	3 A un bureau de méthodes et de qualité et suit des normes de façon rigoureuse, applique des tests de fiabilité et qualité de façon régulière. Typiquement, sait formuler des contraintes à partir de l'analyse des besoins des clients en s'interfaçant avec les services de Vente ou Marketing.	4 Le bureau de méthodes et de qualité suit des normes de façon rigoureuse, applique des tests de fiabilité et de qualité de façon régulière et adopte des méthodes de conception agiles telles le cycle de conception en V ou encore SCRUM ou similaire et sait prendre en compte de nombreuses contraintes en conception tels la dissipation dans les systèmes chauffants ou la gestion d'énergie pour une optimisation de la consommation.	5 Les méthodes de conception agiles sont utilisées surtout au niveau des test à effectuer sur les différentes phases de la conception du produit : la prise en compte de nombreuses contraintes en conception : dissipation dans les systèmes chauffants, la gestion d'énergie pour une optimisation de la consommation, la communication pour la gestion des infrastructures de réseaux de stockage, la gestion des données pour l'exploitation de grandes quantités de données fournies par les systèmes mécatroniques installés.

Tableau 123 : Sous-pratique 1 : Méthodes et tests de qualité mécatroniques de la grande pratique 5 : Méthodes en mécatronique

10.5.2. Sous-pratique n° 2 : Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique

L'entreprise candidate ne peut pas se permettre de s'appuyer uniquement sur les savoir-faire de ses collaborateurs qui se transmettent oralement entre collègues de travail. Elle doit trouver le moyen le plus adaptée pour, d'une part, progressivement intégrer de nouvelles connaissances et compétences et, d'autre part, pouvoir les consigner, afin de ne pas perdre les savoir spécifiques et difficilement imitables. Le partage des connaissances et de l'information sont d'une grande importance ; un fournisseur qui changerait unilatéralement une référence, de matériau par exemple, sans que personne dans la chaîne de conception ne s'en aperçoive, pourrait provoquer des problèmes de mise en conformité et de pertes financières conséquentes. La confection d'artefacts simples pour le suivi des connaissances, comme des fiches métiers, gardées dans les services séparés constituent certes un premier pas en ce sens mais il est conseillé de passer rapidement à un outil informatique qui centralise ces informations et qui permet à toutes les parties prenantes d'y avoir accès pour s'en servir et pour également renseigner ces bases de données en temps réel. Une entreprise à forte compétence mécatronique, quant à elle, sait, de plus, définir les futures compétences à acquérir, à formuler ses futurs besoins en connaissances et contribue même à la rédaction de programmes éducatifs futurs.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE
Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique	Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique	Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique	Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique	Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique
1 Ne formalise jamais les savoir-faire des collaborateurs.	2 Les savoir-faire des collaborateurs se transmettent oralement entre collègues de travail.	3 Les savoir-faire de l'entreprise sont consignés par les différents services de l'entreprise sous forme de fiches métiers ou méthodes métiers.	4 L'entreprise a créé une banque de données sur les savoir-faire des métiers qu'elle intègre pour garder la trace des connaissances accumulées dans le temps.	5 L'entreprise a une méthode de formalisation de connaissances intégrée par un outil informatique et sait de plus définir les futures compétences à acquérir, sait formuler ses futurs besoins en connaissances et contribue à la rédaction de programmes éducatifs futurs.

Tableau 124 : Sous-pratique 2 : Outils de management de connaissances adaptés à la mécatronique de la grande pratique 5 : Méthodes en mécatronique

10.5.3. Sous-pratique n° 3 : Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique

L'entreprise candidate doit être prête à entamer une transformation globale et jusqu'à savoir établir un cahier de charges formalisé de qualification de fournisseur pour ses propres fournisseurs. L'intégration de fournisseurs chez les entreprises ayant atteint une grande maturité diffère entre : a) fournisseurs existants et b) nouveaux fournisseurs. Les nouveaux fournisseurs sont suivis de plus près et doivent passer par différentes étapes de validation. Afin de devenir « fournisseur » auprès d'une entreprise à forte maturité mécatronique, l'entreprise candidate doit être en mesure de développer des processus qui concordent avec celui du donneur d'ordre et ceci à chaque développement d'un nouveau produit.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE	METHODES EN MECATRONIQUE
Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique	Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique	Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique	Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique	Processus d'intégration des fournisseurs adaptés à la mécatronique
1 N'intègrent pas les fournisseurs.	2 L'intégration des fournisseurs n'est pas formalisée.	3 L'intégration des fournisseurs est spécifiée par un Cahier de Charges que ces derniers doivent respecter.	4 Le processus d'intégration de fournisseurs est complexe, même leur chaîne d'approvisionnement doit se plier au Cahier de Charges d'Intégration, ils doivent maîtriser un certain nombre de test de fiabilité sur les composants qu'ils livrent.	4 Le processus d'intégration de fournisseurs est très élaborée et formalisée afin de rendre les processus des fournisseurs compatibles avec celui de l'entreprise. L'intégration diffère entre a) fournisseurs existants et b) nouveaux fournisseurs. Les nouveaux fournisseurs sont suivis de plus près par les différentes étapes de validation. Toute nouvelle création pour le compte client requiert cependant le développement de processus chez les fournisseurs de façon concurrente.

10.6. Grande pratique n° 6 : Innovation Ouverte en mécatronique

La sixième grande pratique, Innovation Ouverte en mécatronique, est constitué de 2 sous-pratiques : Intégration des usagers ou captage de savoir des usagers et Intégration des clients.

La transformation organisationnelle profonde se « passe » également au niveau des approches de captage de besoins des utilisateurs de façon très concrète et directe, d'idées venues d'ailleurs et passe d'une approche de l'innovation fermée et institutionnelle à une approche de l'innovation dite ouverte où les utilisateurs sont incités à participer concrètement au développement des produits. Une organisation moderne dont l'ambition est de devenir mécatronique doit pouvoir capter les idées des marchés à travers les utilisateurs finaux. Cette approche nécessite toutefois la volonté d'une certaine ouverture dépassant la peur de se faire voler les idées ou les données.

10.6.1. Sous-pratique n° 1 : Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers

Pour une entreprise dont la culture d'innovation est ancrée dans la logique du fonctionnement de commerce entre entreprises, passer à la logique de fonctionnement direct avec le consommateur final représente un grand pas à franchir. Cependant l'entreprise candidate à la mécatronique doit opérer ce revirement de culture profond et devenir, en quelque sorte lettrée dans le domaine du numérique d'une façon plus large encore. Les besoins des usagers notamment peuvent être repérés et suivis via des réseaux sociaux, les forums, blogs et wikis, certes, mais idéalement, l'entreprise

mettra en ligne une plateforme et incitera les utilisateurs, à l'aide d'outils adaptés et mis en ligne, à concevoir ou à développer interactivement avec les concepteurs du bureau d'études ou de la R&D, internes à l'entreprise, un produit futur. Ces données peuvent ensuite être réutilisées pour d'autres développements.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE
Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers	Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers	Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers	Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers	Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers
1 Les usagers ne sont jamais consultés.	2 Les données des usagers sont occasionnellement accessibles par le biais des services de vente.	3 L'entreprise s'interface avec les services de marketing régulièrement et surtout en phases de définition de produit.	4 Le portefeuille usagers est suivi via les réseaux sociaux et intégrée à la stratégie d'entreprise. Des scénarii prospectifs sont établis et partagés via le système d'information interne de l'entreprise.	5 Les besoins des usagers sont suivis via des réseaux sociaux, les forums, blogs et wikis et peuvent même concevoir interactivement un produit futur à l'aide d'outils mis en ligne. Ces données sont ensuite utilisées pour de futurs développements de produits. Les utilisateurs peuvent développer des produits directement ou apporter des solutions partielles. Les résultats ainsi récoltés alimentent ensuite le portefeuille clients.

Tableau 126 : Sous-pratique 1 : Intégration des usagers ou captage de savoirs des usagers.de la grande pratique 6 : Innovation Ouverte en mécanique

10.6.2. Sous-pratique n° 2 : Intégration des clients

La transformation organisationnelle demandée à l'entreprise candidate passe également par le fait d'opérer un changement « d'état d'esprit » général où tout le monde est finalement considéré comme client potentiel. Ainsi même les collaborateurs peuvent être appréhendés comme « source » pour la génération d'idées et peuvent contribuer ou co-crée des produits ou proposer des services nouveaux. Cela s'applique, bien entendu, tout spécifiquement aux clients et fournisseurs : ils doivent être régulièrement consultés et même invités à la co-création de produits et services. L'entreprise, dans sa phase mécanique championne et au-delà, fait déjà collaborer

ces différents publics par le biais d'une plateforme informatique. La contractualisation en ce sens peut être également adoptée mais ce n'est pas une règle.

CANDIDAT	DEBUTANT	AVANCE	CONFIRME	CHAMPION
INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE	INNOVATION OUVERTE EN MECATRONIQUE
Intégration des clients	Intégration des clients	Intégration des clients	Intégration des clients	Intégration des clients
1 Les clients ne sont jamais consultés.	2 Les clients sont consultés occasionnellement par le biais des forces de vente. Les informations sont gardées par ces dernières.	3 Les clients sont consultés à l'aide d'outils de créativité par le management R&D pour avoir des retours rapides sur la pertinence de futurs développements des produits (présentation de catalogues de futurs produits aux acheteurs). Des maquettes circulent entre tous les acteurs en phase de faisabilité.	4 Les clients sont intégrés aux projets par une formalisation de co-développement sous forme de contrat. Ils sont consultés tout au long de la chaîne de conception, du lancement de prototypes, ils jouent le rôle de premiers adopteurs. Les documents de vente sont faits en CAO et diffusés déjà dans la phase de lancement de préséries.	5 Tout le monde est considéré comme client potentiel : les collaborateurs qui peuvent contribuer ou co-créer des produits, proposer des services nouveaux, tout comme les clients et fournisseurs. L'entreprise fait collaborer ces différents publics par le biais d'une plateforme informatique. La contractualisation peut être adoptée mais ce n'est pas une règle.

Tableau 127 : Sous-pratique 2 : Intégration des clients.de la grande pratique 6 : Innovation Ouverte en mécanique

Annexe 11 - Tableaux contenant le classement de 33 entreprises par degré de maturité mécatronique et la forme organisationnelle qu'elles présentent

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	1=agile 2=missionnaire	Type d'entreprise	Note différentielle par rapport au modèle théorique	Nom de la Petite et Moyenne entreprise Industrielle (PMI)	Activité	Classement de 1 à 5 par Ratio CA/Taille	Localisation : ville et département
3	I	3	2	Missionnaire M6	6.23	ENGRENAGE SERVICE - PMI	Fabrication d'engrenages et d'organes mécaniques de transmission.	2	39130 Bonlieu, Jura
2	I	3	2	Missionnaire M6	6.15	BALLAND GAILLETON - PMI	Décolletage, ensembles et sous-ensembles, réalisation des produits complexes, co-conception avec la clientèle.	5	96120 Vaulx-en-Velin, Rhône
1	I	4	1	Agile ou Moderne et flexible M8	7.00	I.F.C. OLEOHYDRAULIQUE - PMI	Institut de formation en oléohydraulique.	3	77590, Bois-le-Roi, Seine-et-Marne

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	1=agile 2=missionnaire	Type d'entreprise	Note différentielle par rapport au modèle théorique	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Classement de 1 à 5 par Ratio CA/Taille	Localisation : ville et département
7	II	4	1	Agile ou Moderne et flexible M8	3.2	GKN SERVICE France - PMI	Arbres d'entraînement, réusinage, processus de traitement d'huiles usagées.	5	78560, Chanteloup les Vignes, Yvelines
7	II	3	1	Agile ou Moderne et flexible M8	3.04	REPACK'S - PMI	Commerce interentreprises : joints dynamiques, fournitures et équipements industriels divers, machines de marquage au laser.	4	71290 Cuisery, Saône-et-Loire
5	II	4	2	Missionnaire M6	4.82	HYDRO APPLICATIONS - PMI	Spécialiste de la maintenance hydraulique, usinage de composants.	2	17140 Lagord, Charente-Maritime
7	II	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	6.83	TECHNIFOR GRAVOTECH GROUP	Solutions de marquage de traçabilité; solutions complètes de traçabilité.	4	69140 Rillieux-la-Pape, Rhône

Tableau 128 : Les entreprises de faible maturité mécatronique I et II s'apparentent le plus à l'entreprise Missionnaire mais aussi à moderne et flexible

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	1=agile 2=missionnaire	Type d'entreprise	Note différentielle par rapport au modèle théorique	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Classement de 1 à 5 par Ratio CA/Taille	Localisation : ville et département
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	3.22	DOUCE HYDRO - PMI	Conception et gestion de solutions hydrauliques: amortisseurs viscoélastiques, systèmes de mesure intégrés	5	80300 Albert, Somme
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.96	KTR France - PMI	Miniaturisation d'attelages dans les systèmes de transmission, de freinage, de refroidissement à eau ou à huile	5	69570 Dardilly, Rhône
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.94	KUHNKE PNEUMATIC - PMI	Systèmes de contrôle industriel, réalisation de systèmes automatisés	5	35530 Brécé, île-et-Villaine
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.49	NOVIUM - PMI	Conception, construction d'automatismes de contrôle des processus industriels pour ensembles ferroviaires, maintenance corrective ou préventive, remise en conformité des équipements embarqués.	5	71230 Saint-Vallier, Saône-et-Loire
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.36	SERTA France - PMI	Hydraulique pour applications mobiles, vérins sur mesure	4	85170 Le Poir-sur-Vie, Vendée
10	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible	2.26	ADR - PMI	Conception, fabrication d'organes mécaniques de transmission, actionneurs électromécaniques et optomécaniques.	5	77810 Thomery, Seine-et-Marne
10	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.32	APPAREILS TRANSFORMATION VITESSE - PMI	Mécanique industrielle, embrayages électromagnétiques.	5	78230 Le Pecq, Yvelines
8	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.3	ATLANTA NEUGART France - PMI	Systèmes d'entraînement pour performances dynamiques en robotique, autres produits spécifiques d'entraînement.	5	77127 Lieusaint, Seine-et-Marne
8	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible	1.74	BINDER MAGNETIC - PMI	Transmission synchrones, électromagnétiques et électromécanique, électroaimants, équipement des écluses.	5	92263 Gennevilliers, Hauts-de-Seine
9	III	3	1	Agile ou Moderne et flexible M8	6.02	BOISSET ET COMPAGNIE(BCSA) - PMI	Réducteurs et multiplicateurs de transmission de puissance, bancs d'essai, BE, solutions sur mesure.	5	96120 Vaulx-en-Velin, Rhône
11	III	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	5.08	EDEL TAMP - PMI	Injection plastique : fonctions complètes, bornes automatiques, développement et production mécatronique.	5	7400 Annecy, Haute-Savoie

Tableau 129 : Les entreprises de maturité mécatronique III s'apparentent le plus à l'entreprise Missionnaire ou encore Moderne et flexible

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	2 1=agile 2=missionnaire	Type d'entreprise	Note différentielle par rapport au modèle théorique	Nom de la Petite et Moyenne Entreprise (PMI)	Activité	Classement de 1 à 5 par Ratio CA/Taille	Localisation : ville et département
13	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.89	DELTA EQUIPEMENT - PMI	Pneumatique, robotique, fluides, moteur mécatronique.	5	92252 La Garenne-Colombes, Hauts de Seine
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.58	FP HYDRAULIQUE - PMI	Hydraulique sur mesure, valves directionnelles, maîtrise complète du processus de fabrication des produits en propre.	5	74311 Cluses, Haute-Savoie
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.23	HARMONIC DRIVE - PMI	Robots flexibles : robotique, automatisation, optimisation de produits.	5	69100 Villeurbanne, Rhône
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.39	FLUIDAP - PMI	Solutions globales, centrales hydrauliques, banc didactique, systèmes, composants hydrauliques, services de maintenance.	5	95310 Saint-Ouen-l'Aumône, Val-d'Oise
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.7	PNEUMAX - PMI	Fabrication d'équipements hydrauliques et pneumatiques : multiplicateurs de pression, miniaturisation.	5	67600 Sélestat, Bas-Rhin
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.35	REDEX - PMI	Ensembles mécatroniques complets : entraînement d'axes pré-chargés, machines pour laminage, construction mécanique.	4	45210 Ferrières-en-Gâtinais, Loiret
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	0.54	SM CYCLO France - PMI	Gamme complète de mécanismes d'engrenages et de servo et motoréducteurs - (Groupe SUMITOMO 20 ent.)	5	77700 Serris, Seine-et-Marne
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	2.37	VOITH TURBO - PMI	Mouvement contrôlé : systèmes d'automatisation, systèmes de contrôle de mesure et de commande, équipementier d'hydrocentrales.	5	93160 Noisy-le-Grand, Seine-Saint-Denis
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	0.54	HAWE OTELEC - PMI	Applications hydrauliques dans le mobile, pilotage automatique de systèmes complexes.	5	91250 Tigery, Essonne
12	IV	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.63	WITTENSTEIN - PMI	Technologie mécatronique de propulsion : permet d'entraîner, de piloter ou de réguler avec une précision maximale.	5	9650 Eaubonne, Val-d'Oise
12	IV	2	1	Agile ou Moderne et flexible M8	3.66	CARMAT-PMI	Cœur artificiel : biomatériaux de pointe ; médecins et ingénieurs hautement qualifiés.	0	78140 Vélizy-Villecoublay, Yvelines
12	IV	1		Agile ou Moderne et flexible M8	1.24	DANFOSS - AUTRE	Mesure de température et de pression : vannes proportionnelles, contacteurs électroniques, contacteurs et des micro-démarrateurs.	> 5	78990 Élanecourt, Yvelines
15	IV	5	1	Agile ou Moderne et flexible M8	6.02	INDEEP - PMI	Systèmes électroniques pour accroître les performances et la valeur ajoutée des produits ; en logiciel embarqué ; en système.	5	74960 Cran-Gevrier, Haute-Savoie

Tableau 130 : Les entreprises de maturité mécatronique IV s'apparentent le plus à l'entreprise moderne et flexible

Note globale	"Maturité mécatronique" V = Champion mécatronique	1 = fait de la mécatronique 2 = centre de développement 3 = mécanique de haute précision 4 = centre de formation ou ent. de services utile à la mécatronique 5 = BE	1=agile 2=missionnaire	Type d'entreprise	Note différentielle par rapport au modèle théorique	Nom de l'entreprise	Activité	Classement de 1 à 5 par Ratio CA/Taille	Localisation : ville et département
19	V	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.32	SCHNEIDER ELECTRIC - Grande Entreprise	Disjoncteurs mécatroniques.	> 5	38000 Grenoble, Isère
17	V	1	1	Agile ou Moderne et flexible M8	1.06	NTN SNR - ETI (Entreprise de Taille Intermédiaire)	Mécatronique : roulements, paliers, guidages linéaires, gamme maintenance.	> 5	74010 Annecy, Haute-Savoie

Tableau 131 : Les entreprises de maturité mécatronique V s'apparentent le plus à l'entreprise Moderne et flexible

Annexe 12 - Définitions extraites de la norme NF EN 16271 du Management par la valeur (AFNOR 2013) et retenues pour l'étude de la mécatronique

<p><i>F Une fonction est l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants.</i></p>
<p><i>AF L'Analyse Fonctionnelle est une démarche qui décrit complètement les fonctions et leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées et évaluées</i></p> <p><i>1) La structure fonctionnelle fait partie du résultat de l'Analyse Fonctionnelle. 2) L'Analyse Fonctionnelle couvre deux approches : L'Analyse Fonctionnelle du Besoin (ou Analyse Fonctionnelle Externe) et L'Analyse Fonctionnelle Technique (ou Analyse Fonctionnelle interne)..</i></p>
<p><i>AFB L'Analyse Fonctionnelle du Besoin est la partie de l'Analyse Fonctionnelle qui décrit le Besoin auquel devra répondre le produit sous la forme de fonctions de service et contraintes (Analyse Fonctionnelle Externe ou Analyse Fonctionnelle du Client)</i></p>
<p><i>FS La Fonction de Service est une action demandée à un produit ou réalisée par lui, afin de satisfaire une partie du besoin d'un utilisateur donné ; où 1) Les utilisateurs et le marché ne sont concernés que par les fonctions de service ; 2) Les besoins et les spécifications du client peuvent être exprimées en un ensemble de fonctions de service ; 3) Les fonctions de service sont soit des fonctions d'usage soit des fonctions d'estime.</i></p>
<p><i>FT La Fonction Technique est l'action d'un constituant ou action intervenant entre les constituants du produit afin d'assurer les fonctions de service ; 1) Lorsqu'il choisit une solution globale, le concepteur ou organisateur détermine les fonctions techniques, parfois appelées fonctions internes ; 2) Les fonctions techniques d'un produit ou système complet peuvent être les fonctions de service d'un élément constituant entrant dans la composition du produit ; 3) Les fonctions techniques peuvent dépendre de la technologie disponible.</i></p>
<p><i>SF La Structure Fonctionnelle est l'organisation des fonctions résultant de l'Analyse Fonctionnelle, pouvant être présentée sous forme d'arbre ou de diagramme donnant une présentation écrite, visuelle et complète ; 1) Lorsque des fonctions techniques sont examinées, la structure fonctionnelle indique la façon dont les fonctions agissent entre elles.</i></p>
<p><i>CdCHF Le Cahier de Charges Fonctionnel CdCF est un document par lequel le demandeur exprime ses besoins en termes de fonctions de service et de contraintes.</i></p>
<p><i>C La Contrainte est une caractéristique, effet ou disposition de conception qui est rendu obligatoire ou a été interdit pour quelque raison que ce soit. Aucune autre possibilité n'est laissée ; 1) Les contraintes résultent généralement des limitations dans le choix des solutions pour un projet Analyse par la Valeur ; 2) Les contraintes peuvent résulter des lois, des normes, de la demande du marché. Ces éléments contribuent à la caractérisation des fonctions. Il est judicieux de consigner la relation entre eux et les</i></p>

fonctions auxquelles ils s'appliquent (traçabilité) ; 3) Il est conseillé, étant donnée l'importance que les contraintes peuvent avoir sur la définition du produit, de justifier toute contrainte spécifiée ; 4) Afin de faciliter la lecture des résultats de l'Analyse Fonctionnelle, il est recommandé d'inclure les contraintes dans un chapitre particulier.

Tableau 132 : Définitions extraites de la norme NF EN 16271 du Management par la valeur (AFNOR 2013) et auxquelles on fait référence dans le périmètre de ce travail

Annexe 13 - La liste des autres métriques proposées

13.1. Indicateur de communication totale ComMax

Avec le progrès technologie, les produits mécaniques sont devenus connectés entre eux et avec l'utilisateur ce qui améliore le fonctionnement du système constitué de ces produits.

Il y a quelques décennies encore, les produits mécaniques étaient des systèmes mono-domaine. Depuis leur mise sur le marché et jusqu'à leur fin de vie, ils ne remplissaient qu'une seule fonction et avaient besoin d'une intervention humaine pour la mise en marche et l'arrêt ainsi que pour la gestion du travail. Avec les progrès technologiques, ces produits sont devenus pourvus d'électronique embarquée qui leur apporte de l'intelligence, de l'autonomie et donc performance. De plus, ils sont devenus connectés ce qui permet à l'utilisateur d'être informé si un problème survenait. L'utilisateur n'a plus besoin de surveiller en permanence le produit, ce qui représente un gain de temps en manipulation.

Tout dernièrement encore, le système qui est lui-même constitué de produits connectés entre eux et avec l'utilisateur est devenu ainsi connecté avec son environnement. Cela qui lui permet de tenir compte des variations des propriétés de ce dernier afin de s'adapter en temps réel à ces changements.

Tout ce progrès s'est fait grâce à la mécatronique. Cette dernière a permis d'intégrer de nouvelles fonctionnalités de diagnostic, de traitement d'informations et de communication aux produits mécaniques de base. Pour évaluer un produit mécatronique de façon optimale, il est donc incontournable d'évaluer sa capacité de communiquer car plus un produit est communicant et plus il est mécatronique.

Cet indicateur qui évalue le degré de communication d'un produit mécatronique, ComMax, est donné par la formule suivante :

Équation 19

$$ComMax = S \times \frac{\text{Quantité d'informations échangée}}{\text{Quantité d'informations nécessaire}^*} \times \frac{\text{Nombre de systèmes avec lesquels le produit communique}}{\text{Nombre de systèmes avec lesquels il travaille}}$$

* : C'est la quantité d'informations qui peut être échangée pour un fonctionnement optimal.

Avec S : coefficient d'échange d'informations :

- $S = 0$: Pas d'échange d'informations.
- $S = 0,5$: Les informations sont échangées dans un seul sens ; dans ce cas, le produit envoie ou reçoit les informations.
- $S = 1$: Les informations sont échangées dans les deux sens ; dans ce cas le produit envoie et reçoit les informations.

Si cet indicateur est égal à 1, cela veut dire que le produit envoie et reçoit en temps réel la quantité d'informations nécessaire pour assurer un fonctionnement optimal, avec tous les systèmes avec lesquels il travaille. S'il est égal à 0, cela veut dire que le produit n'échange pas d'informations.

L'indicateur suivant nous permet de mesurer le degré de miniaturisation.

13.2. Indicateur de miniaturisation

L'un des principaux défis de la mécatronique est la miniaturisation de produits. En effet, la mécatronique est une démarche d'optimisation qui vise l'amélioration de tous les aspects d'un produit. En outre, les produits mécatroniques, vu leur aspect multi-

domaine, sont généralement constitués de plus de composants par rapport aux produits mono-domaines traditionnels. La miniaturisation de produits mécatroniques est donc incontournable.

La miniaturisation est la création de produits à des échelles de plus en plus petites. Elle permet la réduction de l'espace occupé et l'allègement du chargement, ce qui rend les produits faciles à transporter, faciles à stocker et souvent plus pratiques à utiliser. Cette réduction de volume et de masse est généralement accompagnée d'une réduction de prix, de la consommation énergétique et de la consommation de matière.

Or, une réduction de volume n'implique pas une réduction de masse car on peut changer un matériau par un autre matériau de masse volumique plus importante. Nous proposons donc un indicateur qui mesure plutôt le taux de réduction de masse. Cet indicateur est donné par la relation suivante :

Équation 20

$$\text{Taux de miniaturisation} = 1 - \frac{\text{Volume du produit}}{\text{Volume d'un produit standard}}$$

Les deux derniers indicateurs permettent de mesurer le degré de l'impact environnemental. Le premier par le taux de recyclabilité et le second par le taux de consommation énergétique.

13.3. Indicateur de recyclabilité

L'industrie a causé plusieurs problèmes environnementaux tels que la pollution ou encore le réchauffement climatique. D'après les estimations de la banque mondiale³⁸, l'activité humaine produit chaque jour environ 10 milliards de kilos de déchets (hors agriculture et construction) ce qui représente une production mondiale de 400 milliards

³⁸ <http://www.planetoscope.com/dechets/363-production-de-dechets-dans-le-monde.html>

de kilos de déchets par an. Le réchauffement climatique est une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre, causé par l'émission de quantités massives des gaz à effet de serre qui sont engendrées par la consommation des énergies fossiles, comme le pétrole ou le charbon.

La politique durable essaye de limiter aux maximum les effets des activités humaines sur l'environnement. Elle incite à faire des produits recyclables pour diminuer les déchets, à privilégier les énergies renouvelables et à diminuer au maximum la consommation des énergies fossiles pour éviter le réchauffement climatique et ses conséquences désastreuses.

La mécatronique est une science qui vise l'amélioration de produits. L'une des améliorations les plus importantes est de réduire l'impact des produits sur l'environnement dans lequel nous vivons, ce qui diminuerait les dangers qui peuvent en résulter.

Ainsi, deux indicateurs qui évaluent la réduction de l'impact des produits sur l'environnement sont proposés ici et donnés par les relations suivantes :

Équation 21

$$\text{Taux de recyclabilité} = \frac{\text{Matière recyclable}}{\text{Matière totale}}$$

Cet indicateur est égal à 1 si le produit est 100% recyclable, ce qui veut dire qu'à la fin du cycle de vie du produit il ne deviendrait pas un déchet. Par contre, la matière dont il est constitué pourrait être réutilisée. Toutefois, si cet indicateur est égal à 0, ceci veut dire que le produit est 0% recyclable : il se transformerait intégralement en déchet à la fin de son cycle de vie. Dans la partie suivante, l'indicateur d'économie d'énergie est présenté.

13.4. Indicateur d'économie d'énergie

Cet indicateur compare l'énergie consommée par le produit à l'énergie consommée par le même produit sans la démarche mécatronique. Cela revient à mesurer l'amélioration apportée par la mécatronique en terme d'économie d'énergie. Il est donné par la relation suivante :

Équation 22

$$\text{Taux d'économie d'énergie} = 1 - \frac{\text{Consommation du produit}}{\text{Consommation d'un produit standard}}$$

Il tend vers 1 si la consommation d'énergie du produit est très faible par rapport à la sienne avant d'être un produit mécatronique. Il est négatif si la consommation énergétique du produit mécatronique est plus grande de la sienne avant d'être un produit mécatronique.