



HAL
open science

Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME.

Alexandre Moeuf

► To cite this version:

Alexandre Moeuf. Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME.. Autre. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLC025 . tel-01849981

HAL Id: tel-01849981

<https://theses.hal.science/tel-01849981>

Submitted on 26 Jul 2018

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.

Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME.

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à CentraleSupélec

École doctorale n°573 Interfaces : approches interdisciplinaires,
fondements, applications et innovation (Interfaces)
Spécialité de doctorat : Science et technologies industrielles

Thèse présentée et soutenue à Saint-Ouen, le 06 avril 2018, par

Alexandre MOEUF

Composition du Jury :

Gilles PACHE Professeur des Universités, Aix-Marseille Université	Président
Georges ABDUL-NOUR Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières	Rapporteur
Vincent CHEUTET Professeur des Universités, INSA Lyon	Rapporteur
Najib Mohammed NAJID Maître de conférence des universités - HDR, Université de Nantes	Rapporteur
Alain RIVIERE Professeur des Universités, SUPMECA	Examineur
Simon TAMAYO-GIRALDO Maître de conférences, Mines ParisTech	Examineur
Samir, LAMOURI Professeur des Universités, Arts et Métiers ParisTech	Directeur de thèse
Robert, PELLERIN Professeur, Polytechnique Montréal	Co-Directeur de thèse
Christophe DANJOU Professeur associé, Polytechnique Montréal	Invité
Salvador, LAMAS Directeur Générale, Exxelia Technologies	Invité
François REGNIER Ancien Directeur de Recherche de Synthélabo	Invité



REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu les membres de mon jury de thèse. Merci à M. Gilles PACHE de m'avoir fait l'honneur de le présider. Je remercie également Messieurs Georges ABDUL-NOUR, Najib Mohammed NAJID et Vincent CHEUTET qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail de recherche. Je remercie plus particulièrement, en plus de son rôle de rapporteur, Vincent CHEUTET sans qui ces travaux de recherche n'auraient pas eu lieu ; il fut mon professeur et celui qui me mit en relation avec Exxelia, aventure qui m'a conduit au grade de Docteur. Merci également à M. Alain RIVIERE pour le soutien qu'il m'a témoigné tout au long de ces trois années de recherche à travers l'école SUPMECA. Je tiens à remercier M. François REGNIER pour l'honneur qu'il nous a fait d'être présent en qualité d'invité lors de la soutenance, ses remarques et compléments concernant la méthode des abacques de Régnier étant d'un enrichissement sans commune mesure.

Merci à toi, Christophe DANJOU, pour tes conseils avisés et pour avoir pris le temps d'échanger avec moi sur l'industrie 4.0 au cours de différents congrès.

Je te remercie tout particulièrement, Samir LAMOURI, directeur de ces travaux de recherche, pour ton soutien et ta ténacité. Tu n'as eu de cesse de me pousser à progresser, à aller chercher au-delà de ce que je pensais faisable. Tu ne m'as jamais abandonné dans les moments difficiles, m'apportant tes conseils avisés tant d'un point de vue scientifique que d'un point de vue humain. Tu n'as cessé de me rappeler que ce travail était le mien, mais il n'existerait pas si tu n'avais pas été à mes côtés pendant ces années. Merci d'avoir pris le temps nécessaire à la réussite de ce projet.

Je tiens à te remercier Robert PELLERIN, co-directeur de ces travaux. Tu m'as permis d'avancer avec méthodologie dans mes recherches. Nos échanges, à distance, ne furent pas toujours aussi nombreux que je l'aurais souhaité, mais tes conseils m'ont systématiquement permis d'avancer.

Merci Simon TAMAYO-GIRALDO, encadrant de ces travaux de recherche, pour ta disponibilité, le temps que tu m'as consacré et les conseils que tu m'as donnés tout au long de ces trois années.

J'adresse mes remerciements à toute l'équipe d'Exxelia Group. En premier lieu à Adrien LELIEVRE, qui fut mon recruteur puis directeur chez Exxelia. Adrien, tu m'as donné ta confiance et de l'autonomie, favorisant un environnement exigeant qui me correspond où j'ai acquis le savoir nécessaire à la réussite industrielle. Le lien entre recherche et industrie, souligné par le jury, n'aurait pas été aussi fort sans toi. De même, je tiens à te remercier, Rodolphe BARBARAY, responsable de production puis du service Méthodes et Industrialisation, qui m'as encadré pendant trois années. Tu m'as toujours laissé du temps pour approfondir mes

travaux de recherche, tout en me poussant à les transcrire de manière pragmatique pour notre usine. Pour ces raisons, tu as fortement contribué au lien important que j'ai construit entre académique et industriel. Je remercie également le directeur général d'Exxelia Technologies, Savaldor LAMAS, pour l'honneur qu'il m'a fait d'être membre de mon jury de thèse en qualité d'invité et pour les missions qu'il m'a confiées chez Exxelia favorisant ma compréhension des enjeux liés aux entreprises.

Je ne peux pas inscrire ici toutes les personnes d'Exxelia avec qui j'ai pu avoir des échanges qui, loin d'être anodins, ont toujours enrichi ma compréhension du monde industriel ; je vous prie de bien vouloir m'en excuser.

Je tiens à te remercier, Romain EBURDY. Je n'aurai pas cru que notre rencontre impromptue, loin de la région Parisienne, puisse me conduire à passer de la mécanique au génie industriel. Tu m'as conseillé des lectures avant de partager avec moi ton expérience et de prendre le temps de répondre à mes nombreuses questions. Nos échanges constructifs autour des entreprises, du management, du pilotage industriel et des nouvelles technologies ont fortement aiguillé mes recherches.

Un grand merci également à mes parents. Ils m'ont appris à ne jamais abandonner, à avoir le goût de l'investissement de soi, et ils m'ont donné la confiance qui dans les moments de doute nous donne la force de ne pas s'arrêter. Ils ont toujours été présents pour m'aider et me soutenir, disponibles pour m'écouter et m'éclairer, partageant avec moi leurs expériences et leurs savoirs. Mon goût pour les PME, ces entreprises dont la composante humaine est des plus importantes, est le fruit des valeurs qu'ils m'ont transmises.

Finalement, j'ai une pensée particulière pour ma femme Nabila à qui je dédicace cette thèse. L'investissement de soi nécessaire à la réalisation d'un travail de recherche de qualité, tout en assurant une présence industrielle chez Exxelia, ne peut se faire sans avoir une sphère privée sur laquelle on peut compter. Depuis plus de 10 ans, tu es mon havre de paix. En 2016, alors que la thèse était encore loin d'être finie, nos vies ont été enrichies d'une présence supplémentaire qui n'a cessé de nous émerveiller depuis et qui m'a parfois accompagné lors des nuits de travail. Bien entendu, il m'aurait été impossible de mener cette thèse à bien sans ton soutien sans faille, et sans que tu ne compenses mes indisponibilités fréquentes. Pour ta patience, ton aide, tes conseils avisés dans les moments de doute, ta compréhension, ton courage et ton soutien indéfectible, je tiens à te remercier du fond du cœur.

A ma femme.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	13
1.1 OJECTIFS ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE	13
1.1.1 <i>Introduction</i>	13
1.1.2 <i>Problématique de recherche</i>	15
1.1.3 <i>Organisation de la thèse</i>	16
1.2 ORIGINALITE DE LA THESE	18
1.2.1 <i>Objets de la thèse</i>	18
1.2.2 <i>Ancrage industriel</i>	18
1.3 APPORTS DE LA THESE	19
1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT	20
CHAPITRE 1 POSITIONNEMENT ET ENJEUX.....	23
1.1 INTRODUCTION	23
1.2 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE : GENIE INDUSTRIEL ET MULTIDISCIPLINARITÉ	24
1.2.1 <i>Génie Industriel et pilotage de systÈme</i>	24
1.2.1.1 Génie Industriel	24
1.2.1.2 Pilotage de systÈme	25
1.2.2 <i>Disciplines scientifiques connexes</i>	27
1.3 ENJEUX ECONOMIQUES, SOCIETAUX ET SCIENTIFIQUES	27
1.3.1 <i>Enjeux économiques</i>	28
1.3.2 <i>Enjeux sociétaux</i>	29
1.3.3 <i>Enjeux scientifiques</i>	30
CHAPITRE 2 LES PME ET LE PILOTAGE INDUSTRIEL	33
2.1 INTRODUCTION	33
2.2 PME : DEFINITIONS ET CARACTERISTIQUES	34
2.2.1 <i>Définitions des PME</i>	34
2.2.2 <i>Caractéristiques managériales des PME</i>	35
2.2.2.1 Entreprises en croissance, la situation des PME	35
2.2.2.2 Types de dirigeants de PME face à la croissance	40
2.2.2.3 Modes de coordination dans une PME	41
2.2.2.4 Synthèse des caractéristiques	45
2.2.3 <i>Conclusion concernant les PME</i>	46
2.3 PILOTAGE INDUSTRIEL DES PME	47
2.3.1 <i>Lean Manufacturing dans les PME</i>	48
2.3.2 <i>L'ERP dans les PME</i>	50
2.3.3 <i>Industrie 4.0 : une nouvelle solution ?</i>	51
CHAPITRE 3 ÉTAT DE L'ART - LES PME A L'ERE DE L'INDUSTRIE 4.0.....	53
3.1 INTRODUCTION	53
3.2 INDUSTRIE 4.0	54
3.2.1 <i>Présentation de l'industrie 4.0</i>	54
3.2.2 <i>Groupes technologiques de l'industrie 4.0</i>	57
3.2.3 <i>Capacités managériales pour le pilotage de systèmes de production</i>	61
3.2.4 <i>Objectifs de performances opérationnelles</i>	63
3.2.5 <i>Cadre d'analyse de la littérature scientifique</i>	63
3.3 ÉTAT DE L'ART : L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PME	64
3.3.1 <i>Stratégie de revue de la littérature</i>	64
3.3.2 <i>Analyse de la littérature</i>	67
3.3.2.1 Objectifs de performance opérationnelle	67
3.3.2.2 Capacités managériales	71
3.3.2.3 Moyens de mise en œuvre de l'industrie 4.0	73

3.3.3	<i>Synthèse de l'État de l'art</i>	80
3.4	PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESE DE RECHERCHE	85
3.4.1	<i>Problématique de recherche</i>	86
3.4.2	<i>hypothèses de recherche</i>	86
3.4.2.1	Hypothèse 1 : il est possible d'identifier les risques de l'industrie 4.0 dans les PME	86
CHAPITRE 4 ÉTUDE PROSPECTIVE DELPHI-REGNIER : IDENTIFICATION DES RISQUES, OPPORTUNITES ET FACTEURS CRITIQUES DE SUCCES POUR L'EXPLOITATION DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PME.....		89
4.1	INTRODUCTION	89
4.2	METHODES PROSPECTIVES	90
4.2.1	<i>Méthodes Delphi</i>	90
4.2.2	<i>Abaques de Régnier</i>	92
4.3	ORGANISATION DE L'ÉTUDE	93
4.3.1	<i>Sélection des experts</i>	93
4.3.2	<i>Création du questionnaire initial</i>	95
4.3.3	<i>Évolution du questionnaire</i>	97
4.4	SYNTHESE DE L'ETUDE DELPHI-REGNIER	97
4.4.1	<i>L'organisation</i>	98
4.4.1.1	La stratégie courte-vue des PME	99
4.4.1.2	La prépondérance du dirigeant et son impact	99
4.4.1.3	Le manque de fonction experte support	100
4.4.1.4	La courte ligne hiérarchique	100
4.4.2	<i>Les technologies</i>	101
4.4.2.1	La donnée au coeur de l'industrie 4.0	101
4.4.2.2	Les moyens de mise en œuvre support des flux de données	102
4.4.2.3	Les technologies supportant les flux physiques	103
4.4.3	<i>L'implantation de l'industrie 4.0</i>	103
4.4.3.1	Le Leader du projet de déploiement	103
4.4.3.2	La communication concernant le projet	104
4.4.3.3	La compétence : formation versus conseil	104
4.4.3.4	Simplifier les outils de l'industrie 4.0	105
4.4.4	<i>Les opportunités offertes par l'industrie 4.0</i>	105
4.5	CONCLUSION DE L'ÉTUDE DELPHI-REGNIER	106
4.5.1	<i>Les réponses aux objectifs</i>	106
4.5.1.1	Les risques	107
4.5.1.2	Les facteurs critiques de succès	107
4.5.1.3	Les opportunités	109
4.5.2	<i>Limites et perspectives</i>	109
4.5.2.1	Les limites	109
4.5.2.2	Les perspectives	110
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		113
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		119
ANNEXE 1 : SYNTHESE QUESTIONNAIRE N° 1 – ÉTUDE DELPHI-REGNIER		133
SYNTHESE		133
<i>Thème organisationnel</i>		133
<i>Thème technique</i>		134
COMMENTAIRES ITEM PAR ITEM		135
<i>Thématique organisationnelle</i>		135
<i>Thématique technique</i>		140
ANNEXE 2 : SYNTHESE QUESTIONNAIRE N° 2 – ÉTUDE DELPHI-REGNIER		147
SYNTHESE		147
<i>Thème organisationnel</i>		147

<i>Thème technique</i>	148
COMMENTAIRES ITEM PAR ITEM	149
<i>Thématique Organisation</i>	149
<i>Thématique Technologie</i>	153
ANNEXE 3 : SYNTHÈSE QUESTIONNAIRE N° 3 – ÉTUDE DELPHI-REGNIER.....	161
SYNTHÈSE	161
COMMENTAIRES ITEM PAR ITEM	162

Introduction

1.1 OJECTIFS ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

1.1.1 INTRODUCTION

Dans un contexte international de concurrence forte, les acteurs des mondes économiques et industriels cherchent continuellement des gains de performance. Ces gains passent par deux vecteurs de progression :

- une réduction des coûts pour une même valeur ajoutée ; et
- une proposition innovante de produits et de services permettant la création d'une nouvelle valeur ajoutée.

La majeure partie de cette valeur ajoutée, et des coûts nécessaires à son obtention dépendent des PME (Petites et Moyennes Entreprises). Les PME représentent la part de valeur ajoutée la plus importante de la supply chain (Entreprises, 2014). La Commission européenne définit une PME comme une entreprise ayant moins de 250 employés et dont le CA (chiffre d'affaires) n'excède pas 50 millions d'euros. En France, ces entreprises pèsent pour 80 % des emplois industriels, elles sont 135 000 et génèrent un CA de 755 milliards d'euros. **Nous positionnons notre travail de thèse dans le champ de la modification et de l'optimisation des processus industriels des PME en vue d'améliorer leur performance industrielle.**

Depuis plus de 200 ans, les entreprises ont connu 3 révolutions industrielles :

- la première est liée à l'exploitation du premier métier à tisser mécanisé en 1784, avec l'intégration de la force hydraulique et à vapeur dans les ateliers de fabrication ;
- la seconde révolution est l'exploitation de la première chaîne de production automatisée dans les abattoirs de Cincinnati en 1870, avec l'introduction de la production de masse fondée sur le principe de la division du travail et sur l'utilisation de l'énergie électrique ; et

- la troisième révolution commence avec l'exploitation des automates programmables industriels en 1969, le Modicon 084 ; l'introduction de l'électronique et des technologies de l'information permet ainsi une automatisation élargie de la production.

Depuis le début des années 2000, de nouveaux outils numériques ont fait leur apparition. Les coûts associés à l'informatisation des informations ont continuellement chuté depuis plus de 60 ans :

- 1 To (Téraoctets) coûtait 14 millions d'euros € en 1980 chez Apple, cela coûte 55 € en 2017 ;
- 1 Gflops (Giga-flops : opération en virgule flottante par seconde) coûtait 1 milliard d'€ en 1961, il coûte moins de 60 centimes en 2010 ; et
- 1 Mbps (Mégabits / seconde) coûtait 1 200 € en 1998, 5 € en 2010.

Ces réductions de coûts ont permis l'émergence d'outils, de groupes technologiques qui intègrent de multiples fonctions de communication, de stockage de données et de calcul ; l'Internet des Objets (IoT : *Internet of Things*) ou les Systèmes Cyber Physiques (CPS : *Cyber Physical Système*) par exemple. Le concept d'Industrie 4.0 correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production : l'objectif est la mise en place d'usines dites « intelligentes » (« *smart factories* ») capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle révolution industrielle. Ses bases technologiques sont l'Iot et les CPS. Le concept exprime l'idée que le monde se trouve aux prémices d'une quatrième révolution industrielle. La nouvelle révolution serait fondée sur l'usine intelligente, caractérisée par une interconnexion des machines et des systèmes au sein des sites de production, mais aussi entre eux et l'extérieur (clients, partenaires, autres sites de productions). Le concept a été mis en évidence pour la première fois lors la foire de Hanovre (salon de la technologie industrielle) en 2011. En 2013, un rapport décrivant le concept a été présenté par un groupe de travail transdisciplinaire à la foire de Hanovre. **L'industrie 4.0 est un concept qui vise à la synchronisation en temps réel des flux pour tendre à la fabrication unitaire et personnalisée des produits** (Kohler and Weisz, 2016).

Nous positionnons nos travaux dans le champ de l'exploitation de l'industrie 4.0 dans les PME en vue d'optimiser le pilotage industriel.

1.1.2 PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

Les PME n'ont pas attendu l'industrie 4.0 pour améliorer leur processus, cependant elles s'inspirent bien souvent de recettes qui font leurs preuves au sein des grandes entreprises, telles que le Lean Manufacturing (Womack et al., 1990) et les ERP (*Enterprise Resource Planning*) (Baglin et al., 2015). La majorité des implantations Lean dans les PME sont en fait des échecs, moins de 20 % des cas étant considérés comme des réussites (Baker, 2002).

Pour Michel BAUER «*Même quand ils parlent de PME, les économistes et les sociologues tout comme les responsables économiques et politiques du pays pensent en fait « grande entreprise ».* La PME est donc implicitement décrite comme « *une grande entreprise en réduction* » et/ou comme « *une grande entreprise en puissance* », c'est-à-dire comme une grande entreprise qui du fait d'une taille réduite n'a pas « *encore* » tous les attributs de l'entreprise. » (Bauer, 1999). En effet, le constat que nous faisons est que la PME est un univers à part entière, avec ses codes, ses modes de coordinations, ses propres atouts et ses propres faiblesses.

Ainsi, exploiter l'industrie 4.0 dans les PME est spécifique. Cette thèse aborde cette question avec pour objectif général **d'identifier les vecteurs d'amélioration de la performance industrielle des PME à l'ère de l'Industrie 4.0**. Plus spécifiquement, nous cherchons à atteindre les 6 sous-objectifs suivants :

1. identifier les caractéristiques managériales propres aux PME ;
2. identifier et décrire les outils et techniques en lien avec l'industrie 4.0 ;
3. recenser les cas documentés d'application de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME ;
4. identifier les risques inhérents à l'adoption d'initiatives 4.0 au sein des PME ;
5. identifier les opportunités issues du 4.0 pour améliorer la performance industrielle des PME ; et
6. identifier les facteurs critiques de succès pour l'implantation de l'industrie 4.0 au sein des PME.

1.1.3 ORGANISATION DE LA THESE

Pour répondre aux objectifs fixés, nous avons réalisé nos travaux de recherche suivant une méthodologie en trois phases (Figure 1).

1. Nous avons effectué une analyse des caractéristiques des PME à travers une étude de la littérature et une observation de terrain au sein des différentes entités d'Exxelia Group¹.
2. Suite à nos observations, nous avons construit un cadre d'analyse visant à supporter notre étude de la littérature des cas empiriques d'industrie 4.0 au sein des PME.
3. Notre troisième phase est constituée d'une étude Delphi-Régnier visant à répondre aux trois derniers objectifs de nos travaux de recherche.

¹ Voir section 1.2.2

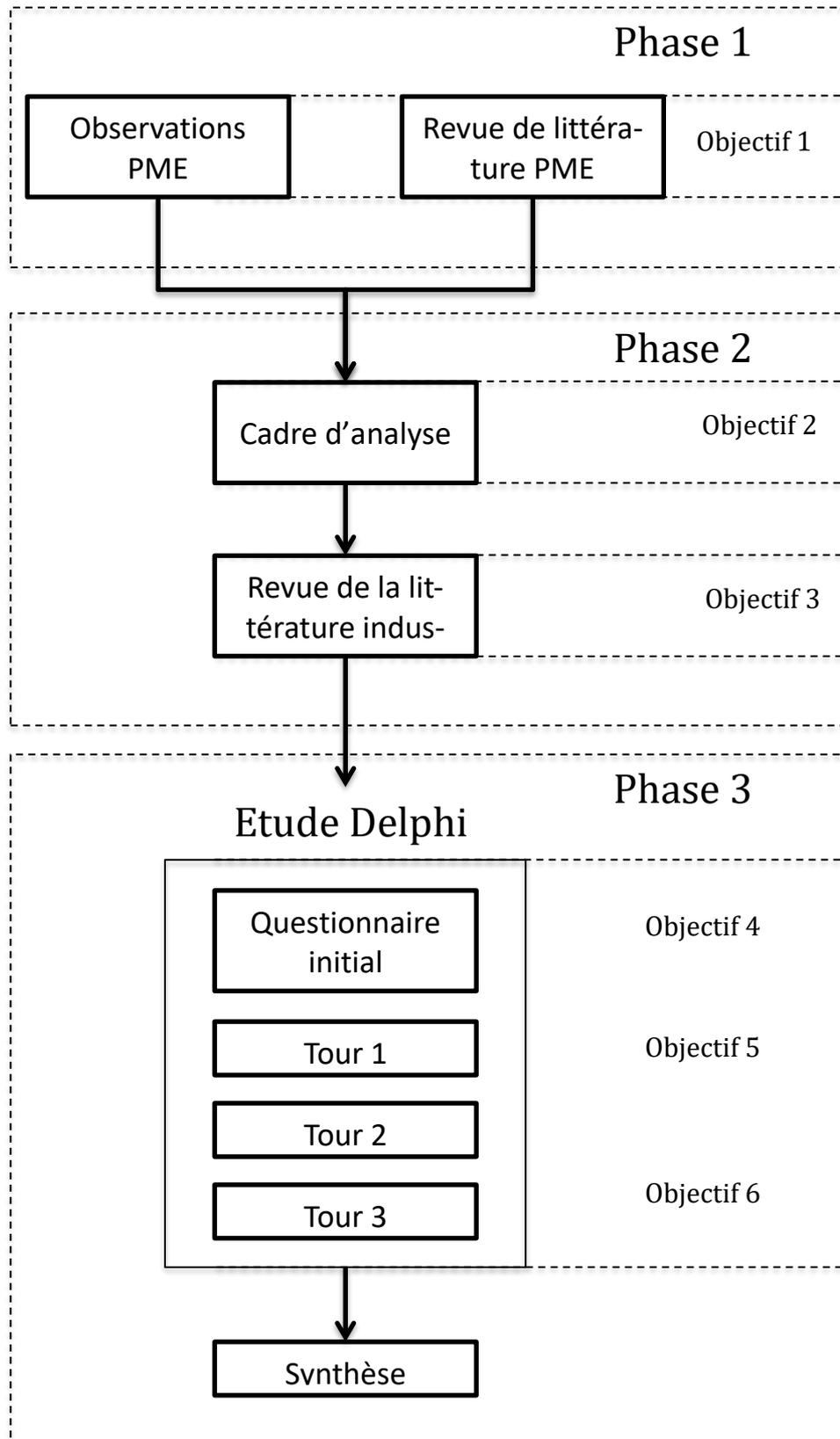


Figure 1 : Phase des travaux de recherche et réponse aux objectifs

1.2 ORIGINALITE DE LA THESE

1.2.1 OBJETS DE LA THESE

Notre recherche se focalise sur l'exploitation des groupes technologiques qui constituent l'industrie 4.0. Ces groupes technologiques, que nous détaillons au Chapitre 3, sont à l'interface de plusieurs thématiques scientifiques : électroniques, science de l'information, mathématiques, informatiques. L'ensemble de ces groupes technologiques apporte des atouts à la PME pour un coût de mise en œuvre et d'exploitation de différentes natures (financier, stress, connaissances).

Nos travaux abordent un environnement industriel particulier : les PME. Cet objet d'étude émerge depuis quelques années seulement, pour Bernard RAMANANTSOA, ancien directeur général de HEC Paris « *Longtemps privées de visibilité, les PME et les ETI (Entreprises de Taille Intermédiaire) sortent depuis quelque temps de l'ombre.* ». En effet, le nombre de publications concernant les PME ne cesse d'augmenter avec une forte progression depuis 2011 comme l'illustre la Figure 2.

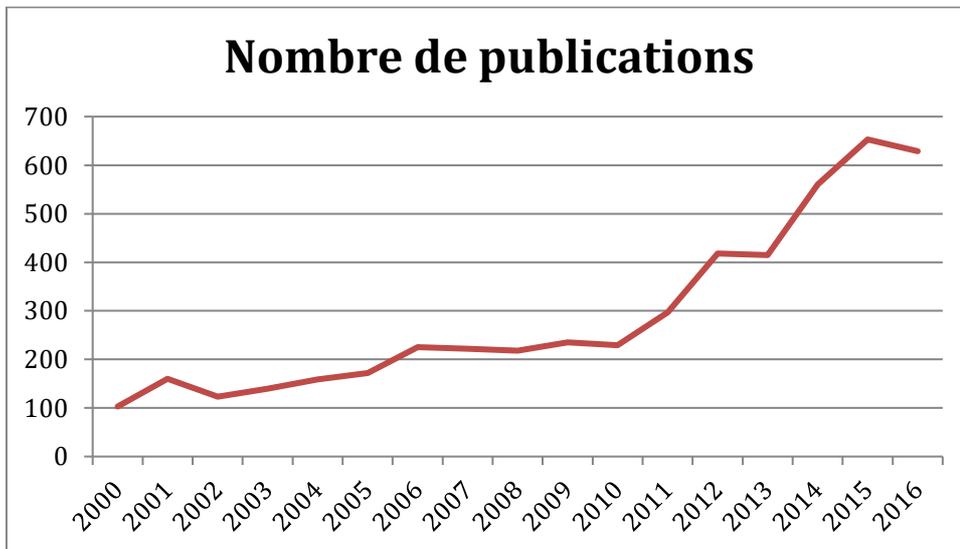


Figure 2 : Publication concernant les PME sur ScienceDirect depuis 2000

1.2.2 ANCRAGE INDUSTRIEL

Le travail présenté dans cette thèse est le fruit de trois ans de recherche pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de l'ingénieur en Génie industriel, de l'Université de Paris Saclay. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un partenariat académique-industriel entre Supméca Paris et Exxelia Technologies, sous la con-

vention CIFRE n°2012/1589 (Convention industrielle de Financement par la Recherche) régies par l'Association Nationale pour la Recherche en Technologie (ANRT).

Ces travaux s'inscrivent dans la démarche d'amélioration des processus d'Exxelia Technologies. Exxelia Technologies, ex-Eurofarad, est une société fondée en 1965, son activité principale est aujourd'hui la conception et la fabrication de composants passifs : condensateurs céramiques, condensateurs films plastiques et mica, filtres, capteurs de position, collecteurs tournants et mécanique de précision. Exxelia Technologies compte deux sites industriels : Chanteloup-En-Brie (77) et Mar-moutier (67).

Exxelia Technologies est constituée d'un agrégat de 7 PME acquises lors de croissance externe organisée depuis plus de 15 ans. L'auteur de cette thèse est également *Supply Chain Project Manager* responsable de l'amélioration du pilotage des processus industriels de l'entreprise.

1.3 APPORTS DE LA THESE

Ce travail de recherche présente plusieurs apports réalisés au cours des trois années de recherche. Tout d'abord, lors des recherches préliminaires sur les PME et sur le pilotage industriel, nous avons montré que les PME présentaient des faiblesses et des forces spécifiques au regard des démarches de transformation et d'amélioration tel que le Lean Manufacturing (Moeuf et al., 2016).

Ensuite, nous avons effectué une analyse de l'état de l'art sur le pilotage industriel des PME à l'aide de l'industrie 4.0. Pour cela, nous avons défini un cadre d'analyse original, adapté des travaux de PORTER (Porter and Heppelmann, 2014), RAYMOND (Raymond, 2005) et du Boston Consulting Group (Ruessmann et al., 2015). Ce cadre nous a permis de structurer notre revue de la littérature scientifique (Moeuf et al., 2017b, 2017d). Nous avons ainsi montré que :

- l'industrie 4.0 est considérée par les PME comme un ensemble d'outils permettant d'améliorer les modèles d'affaires actuelles, au lieu d'être considéré comme une opportunité pour de nouveaux modèles d'affaires ; et
- l'industrie 4.0 est complexe à mettre en œuvre pour certains de ces groupes technologiques (notamment les CPS), alors que d'autres groupes technologiques sont peu coûteux et sont mis en œuvre facilement comme le *Cloud Computing*.

En parallèle de ces démonstrations et à l'aide de l'implication de notre recherche dans le monde industriel, à travers l'entreprise Exxelia Technologies, notre travail présente un ancrage industriel important et réaliste au regard des contraintes que peuvent connaître les dirigeants de PME.

Enfin, à l'aide d'un ensemble d'experts consultés lors de l'étude Delphi-Régnier, nous avons identifié les risques et les points d'intérêt concernant l'exploitation de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME.

1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT

Ce document se divise en quatre chapitres :

- **Chapitre 1 : Positionnement et enjeux**

Ce chapitre présente le positionnement général de notre recherche par rapport aux champs et enjeux scientifiques.

Nous positionnons notre recherche au sein de la communauté de recherche en Génie industriel et de notre laboratoire d'accueil, Quartz, dont les objets de recherche sont les sciences et ingénieries des systèmes complexes. Nous montrons que notre recherche se situe également à l'interface de plusieurs autres thématiques scientifiques telles que les sciences de gestion, l'informatique et les sciences de l'information. D'autre part, nous présentons au sein de cette partie les enjeux économiques, sociétaux et scientifiques de notre recherche concernant les PME.

- **Chapitre 2 : les PME et le pilotage industriel.**

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte spécifique des PME (en phase de croissance), nous présentons ensuite les modes de coordination et de management de ces entreprises avant de conclure sur les caractéristiques spécifiques des PME.

Ensuite, nous présentons le pilotage industriel et nous décrivons plusieurs méthodes de pilotage que les PME ont déjà expérimentées, nous montrons pourquoi ces méthodes ne sont pas parfaitement adaptées au contexte particulier des PME.

Ainsi, nous envisageons d'exploiter l'industrie 4.0 pour le pilotage des PME. Nous montrons en quoi ce nouveau paradigme semble répondre aux caractéristiques des PME et à leur besoin concernant le pilotage industriel.

- **Chapitre 3 : l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME, état de l'art.**

Dans ce chapitre, nous donnons une définition plus précise de l'industrie 4.0. Nous détaillons les différents groupes technologiques sur lesquels s'appuie l'industrie 4.0. Nous présentons un cadre d'analyse de la littérature scientifique s'appuyant sur les groupes technologiques, les capacités managériales possibles et les objectifs de performance industrielle.

Suite à la présentation de notre stratégie de revue de la littérature, nous détaillons l'état des connaissances concernant l'exploitation de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME.

Nous présentons dans ce chapitre la problématique soulevée par l'état de l'art et les hypothèses scientifiques considérées pour la suite de cette recherche.

- **Chapitre 4 : étude prospective de consultation d'expert par la méthode Delphi-Régnier.**

L'état de l'art a montré le peu de cas empirique portant sur l'exploitation de l'industrie 4.0 dans les PME. Pour identifier les risques et opportunités de l'industrie 4.0 dans les PME, il est nécessaire de passer par une méthode prospective de consultation d'experts. Nous avons sélectionné un panel d'experts, puis nous avons réalisé une étude Delphi-Régnier dans le but d'identifier des consensus d'opinion concernant l'industrie 4.0 dans les PME. Nous avons ainsi identifié les facteurs clés de succès, *Critical Success Factor* (CSF) visant à exploiter l'industrie 4.0 dans le but d'améliorer le pilotage industriel des PME.

Dans ce chapitre, nous décrivons et justifions l'exploitation de la méthode Delphi-Régnier, puis nous analysons les résultats.

Enfin, nous concluons notre document par une synthèse des apports, des limites et des perspectives de notre recherche.

CHAPITRE 1

Positionnement et enjeux

1.1 INTRODUCTION

Dans cette partie, nous présentons le positionnement de notre travail de recherche au sein de la communauté scientifique et les enjeux que représente une recherche en Génie industriel.

Nous positionnons d'abord notre travail dans le monde scientifique, ainsi nous rappelons les définitions des sciences en génie industriel. Nous montrons également comment cette recherche a pour originalité d'établir des ponts entre plusieurs disciplines scientifiques telles que les sciences de gestion, les sciences de l'information et de l'informatique.

Dans une seconde partie, nous présentons les enjeux de notre recherche sur le pilotage industriel des PME à l'aide de l'industrie 4.0, sur le plan économique et sur le plan scientifique. D'une part, la recherche en génie industriel est un levier d'innovation et d'optimisation des processus de production et donc de la performance industrielle des entreprises, tout en permettant de veiller à ce que les nouveaux paradigmes restent **éthiques** et **humains** ; dans ce contexte, cette recherche peut intéresser les acteurs du monde socio-économique et le grand public. D'autre part, parce que cette recherche explore les thématiques scientifiques émergentes que sont les PME et l'industrie 4.0 ; de nombreux pays se lancent dans l'industrie 4.0, appelée « Smart Manufacturing » aux États-Unis ou « Internet + » en Chine. La Corée du Sud par exemple s'intéresse depuis plusieurs années à la robotisation, actuellement il s'agit du pays le plus équipé en robot avec un chiffre de 425 robots par employé, alors que la France n'en compte que 125 par employé (Bidet-Mayer, 2016). L'industrie 4.0 concerne trois axes d'amélioration

- le développement de l'offre technologique ;
- le soutien à l'amélioration de l'appareil de production ; et

- le développement des compétences pour accompagner les transformations.

Les différents pays (acheteurs de solutions technologiques ou concepteurs-fabricants de ces solutions) n'ont pas la même politique au regard de l'industrie 4.0. De même, en fonction de la part de l'industrie dans la richesse de ces États, l'investissement et l'enjeu autour de l'industrie 4.0 ne seront pas les mêmes. En Corée du Sud et en Chine par exemple, l'industrie pèse pour 30 % dans le PIB. Ainsi la Corée du Sud a mis en place le Manufacturing Industry Innovation 3.0 Strategy visant à soutenir la recherche et le développement de l'industrie 4.0. Ainsi, nos travaux ne manqueront pas d'intéresser la communauté scientifique de génie industriel.

1.2 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE : GENIE INDUSTRIEL ET MULTIDISCIPLINARITÉ

1.2.1 GENIE INDUSTRIEL ET PILOTAGE DE SYSTÈME

1.2.1.1 GENIE INDUSTRIEL

Selon l'American Institut of Industrial Engineers:

*Le **Génie industriel** englobe la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés. Il utilise les connaissances provenant des sciences mathématiques, physiques et sociales, ainsi que les principes et méthodes propres au « génie » ou à l'art de l'ingénieur, dans le but de spécifier, prédire et évaluer les résultats découlant de ces systèmes.*

Le Génie industriel est une activité apparue avec l'ère industrielle, alors que la recherche en génie industriel est récente, avec une introduction en France vers les années 80. Cependant, les travaux précurseurs de Henri FAYOL par exemple date de 1917 (Fayol, 1917) dans lesquels il décrit les 6 groupes d'opérations :

1. techniques : production, fabrication, transformation ;
2. commerciales : achats, ventes, échanges ;
3. financières : recherche et gérance des capitaux ;
4. sécurité : protection des biens et des personnes ;
5. comptabilités : inventaire, bilan, coût de revient, statistique, etc. ; et

6. administratives : prévoyance, organisation, commandement, coordination et contrôle.

Ainsi, Henri FAYOL donne une première définition de la science du génie industriel dans ce 6^e groupe : administrer c'est prévoir, organiser, commander, coordonner et contrôler :

- prévoir, c'est-à-dire scruter l'avenir et dresser le programme d'action ;
- organiser, c'est-à-dire constituer le double organisme matériel et social et l'entreprise ;
- commander, c'est-à-dire faire fonctionner le personnel ;
- coordonner, c'est-à-dire relier, unir, harmoniser tous les actes et tous les efforts ; et
- contrôler, c'est-à-dire veiller à ce que tout se passe conformément aux règles établies et aux ordres donnés.

Le génie industriel englobe la conception, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés, en utilisant les principes et méthodes des sciences pour l'ingénieur ainsi que les connaissances issues des sciences mathématiques, physiques et sociales ; il vise l'optimisation des performances globales de l'entreprise.

Dans le cadre de nos travaux, nous ciblons l'amélioration des systèmes intégrés à travers l'optimisation du pilotage des systèmes de production. Il y a eu de nombreuses publications sur le pilotage de système de production, force est de constater qu'il n'y a pas de définition qui fasse consensus.

1.2.1.2 PILOTAGE DE SYSTÈME

D'après le dictionnaire Larousse 2017, « piloter » signifie : conduire un véhicule qui exige une certaine compétence technique. Implicitement, piloter fait référence à des systèmes complexes.

Piloter revient à définir deux éléments (Mirdamadi, 2009) :

- fixer un objectif à atteindre ; et
- définir le meilleur chemin pour y parvenir.

Ainsi, pour piloter il faut surveiller la trajectoire réelle, corriger la trajectoire en cas de dérive, modifier la trajectoire cible si des événements extérieurs viennent à modifier les possibilités offertes au système, modifier la cible si des informations

montrent que la cible n'est plus d'actualité (changement d'ordre de priorité par exemple).

Pour l'APICS (American Production and Inventory Control Society) le pilotage de production est le : « *planning, using resources, controlling production, and measuring and evaluating operational performance* ». On retrouve ici la notion de cible (planification) et de trajectoire (*operational performance*) en s'appuyant sur les ressources.

Le MOIGNE (1974) introduit la séparation entre sous-système opérant, sous-système d'information et sous-système de décision comme l'illustre la Figure 3. Ainsi, le pilotage de système revient à organiser les relations entre sous-système opérant et sous-système de décision à travers l'exploitation du sous-système d'information. Dans le cadre du système de production, cela induit un asservissement entre la prise de décision et la boucle de rétroaction avec le système opérant pour s'assurer que la prise de décision permet l'atteinte de l'objectif.

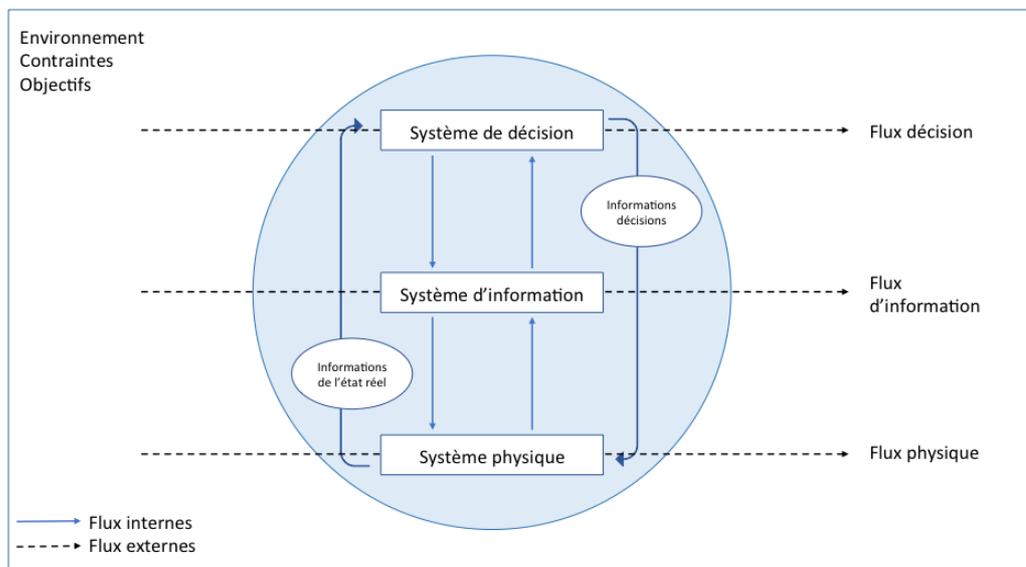


Figure 3 : modélisation de système selon Le Moigne (1974)

Selon Le Moigne, le pilotage consiste à la résolution de problème que connaît l'organisation. Cette résolution passe par plusieurs échelles de temps : stratégique pour le long-terme, tactique pour le moyen terme et opérationnelle pour le court terme. Notre recherche s'intéresse à ces trois niveaux.

Enfin, le pilotage industriel nécessite des Méthodes de pilotage, c.-à-d. des tâches à réaliser, des outils et techniques supportant les tâches, des résultats attendus, une définition des « rôles » (ceux responsables des tâches) et enfin un modèle

d'information visant à relier ces quatre premiers éléments (Zellner, 2011). La recherche en génie industriel est donc reliée également aux sciences de gestion dans le but de coordonner les différents intervenants de l'organisation.

1.2.2 DISCIPLINES SCIENTIFIQUES CONNEXES

Dans de nombreuses activités de recherche, plusieurs disciplines tendent à se rejoindre autour d'une thématique commune. Le Génie industriel par exemple se sert des savoirs en informatique et en sciences de gestion. Il existe de nombreuses connexions entre le Génie industriel et les sciences humaines. Par exemple, le développement d'un interface Homme-Machine fait intervenir des experts des deux disciplines (Constantinescu et al., 2015).

Dans notre recherche, la discipline principalement concernée est le Génie industriel, nous visons à aider les décideurs des PME dans le but d'améliorer les processus industriels au quotidien en tirant profit des nouvelles opportunités technologiques. Afin de cibler avec précision les besoins des PME et comment y répondre, nous devons exploiter les recherches déjà effectuées en sciences de gestion permettant de caractériser les PME. L'étude de l'industrie 4.0 fait appel à des groupes technologiques complexes tels que le *Big Data*, le *Cloud Computing*, les systèmes cyber physique et l'internet des objets. Ces groupes technologiques sont exploités à des fins de pilotage industriel, ainsi il s'agit d'exploiter la génération de l'information dans le but d'améliorer la prise de décision. Nous faisons donc appel aux sciences de l'information par l'exploitation des technologies de l'information.

Ainsi, notre recherche est centrée sur le Génie industriel, mais peut intéresser un terrain pluridisciplinaire qui réunit le Génie industriel, les sciences de l'information et de l'informatique et les sciences de gestion.

1.3 ENJEUX ECONOMIQUES, SOCIETAUX ET SCIENTIFIQUES

Dans cette partie, nous explicitons les enjeux économiques, sociétaux et scientifiques de notre recherche. Nous abordons ainsi la place des PME dans l'environnement économique français, les enjeux sociétaux relatifs à la transformation du travail induite par l'industrie 4.0 ainsi que les enjeux scientifiques concernant le pilotage industriel des PME.

1.3.1 ENJEUX ECONOMIQUES

Tout d'abord, les PME tiennent une place importante dans l'économie française, le Tableau 1 illustre la place que représentent les PME dans le paysage économique français (Chevalier, 2014). Par exemple, les PME représentent plus de 3 500 000 emplois, et un CA cumulé supérieur à 755 milliards d'euros.

	Grandes entreprises	ETI	PME	Microentreprises
Nombres d'entreprises	200	4 464	134 290	2 896 319
Effectifs salariés	3 481 771	2 836 363	3 539 850	2 508 352
CA (M€)	1 281 809	962 712	755 817	549 498
Valeur ajoutée hors taxe (M€)	342 830	225 868	221 005	216 185
Salaire brut annuel (k€)	41	38	34	36
Tx d'exportation (CA / CA export)	20,8	18,9	9,8	3,6

Tableau 1 : quelques chiffres concernant les PME françaises (Chevalier, 2014)

Plus de la moitié des ETI existantes aujourd'hui étaient des PME il y a 10 ans. Enfin, selon le baromètre export 2014 réalisé par Euler Hermès, 80 % des PME et ETI française avaient l'intention d'augmenter leur chiffre d'affaires à l'export en 2015. Ainsi, les PME représentent un levier de croissance important pour la France. Cependant, elles sont aussi en difficulté depuis 2009, elles accusent un taux de marge brute inférieure à 20 %, lorsque ce taux était à plus de 25 % avant la crise de 2008.

L'industrie 4.0 représente une part non négligeable de croissance. Selon la Commission européenne, le potentiel d'investissement annuel sur l'Union européenne serait de 91 milliards d'euros, soit 1 100 milliards d'euros d'ici 2030. Avec cette mobilisation des acteurs autour de l'industrie 4.0, les perspectives d'amélioration de la productivité sont proches de 30 % selon certaines études (Kohler and Weisz, 2015). Cependant, ces estimations sont à considérer avec prudence, car elles sont établies par des cabinets de conseil et d'experts, très optimistes sur la croissance

du numérique. La méthode utilisée pour ces calculs de prévision est tenue confidentielle et l'horizon de temps concerné laisse augurer quelques marges d'incertitudes.

Cependant, même si 30 % et 1 100 milliards d'euros sont des chiffres optimistes, il n'en demeure pas moins que l'apport du numérique dans les entreprises reste un vecteur d'opportunités d'améliorations industrielles et de nouvelles propositions de valeurs pour les entreprises.

1.3.2 ENJEUX SOCIETAUX

Tout comme les précédentes révolutions industrielles, les améliorations apportées en termes de productivité et/ou de proposition de valeur ont également leur lot de risques concernant la société. Par exemple, lors de la mécanisation des métiers à tisser, le gain de productivité fut tellement important que de nombreux emplois disparurent puis se transformèrent en d'autres activités.

L'étude menée en 2013 par Frey et Osborn (2017) montre que 47 % des emplois aux États-Unis sont fortement menacés par la « digitalisation ». Pour ces auteurs, l'essentiel de l'emploi dans la production est menacé, mais aussi les fonctions administratives : acheteurs, logistiques, ventes, contrôleurs de gestion, etc. avec des conséquences importantes pour la classe moyenne. Pour arriver à ces chiffres, les auteurs considèrent que les tâches répétitives peuvent être automatisées, mais également les tâches non répétitives. Par exemple, des start-up se créent pour remplacer le métier de juriste tel que l'entreprise « ça crée pour moi », <https://www.cacreepourmoi.fr/>, qui permet de créer une entreprise directement en ligne. Jeremy BOWLES a appliqué la même méthode à l'Union européenne et arrive sensiblement aux mêmes chiffres, variant de 45 % à 60 % des emplois en fonction des pays (Bowles, 2014).

Autre risque important, la modification du travail en lui-même. Nous avons connu d'autres expériences traumatisantes pour les employés. Par exemple, la mise en œuvre des techniques issues du Lean Manufacturing peut avoir de grave conséquence sur les employés lorsque ceux-ci sont mal maîtrisés par les donneurs d'ordre. Cadences imposées en écart par rapport aux possibilités réelles, technologies non fiabilisées avant exploitation par les employés, faire passer l'amélioration continue après les gains de productivité immédiats (Anact, 2013).

De même, l'industrie 4.0 risque de modifier en profondeur le travail des employés de demain dans les entreprises industrielles. Actuellement, il reste complexe de présager des modifications en question, peu d'études s'y attellent. Par exemple,

les travaux de Dombrowski et Wagner montrent qu'il y aura probablement un impact de l'industrie 4.0 concernant la relation entre le travailleur et le travail, cependant les auteurs ne précisent pas les impacts et concluent qu'il est nécessaire de continuer à faire des recherches sur ce sujet (Dombrowski and Wagner, 2014).

L'usine sans hommes est actuellement « un épouvantail ». Plusieurs expériences ont été menées pour augmenter l'automatisation des chaînes de production (Kohler and Weisz, 2016). Par exemple, Toyota s'était fixé comme objectif de produire plus de 10 millions de voitures par an, pour cela il visait à automatiser la fin de chaîne de production, là où ses principaux concurrents ne dépassaient pas 5 % d'automatisation, Toyota visait 25%. Ainsi, la responsabilité des salariés se limitait à l'approvisionnement des machines d'assemblage. Depuis 2009, Toyota a cependant dû rappeler 3,8 millions de voiture pour un problème de frein et 6,4 millions de voitures pour un problème de fixation de volant et de siège. Depuis, l'entreprise fait marche arrière et réintègre l'Homme pour regagner en savoir-faire dans la fabrication. Le numérique ne fait que renforcer le constat déjà établi qu'en impliquant les opérateurs, ils peuvent mieux identifier les potentielles optimisations et les gisements de gains.

1.3.3 ENJEUX SCIENTIFIQUES

L'industrie 4.0 est un sujet qui concerne de plus en plus d'acteurs du monde académique, comme le montre la Figure 4 qui représente le nombre de publications sur ScienceDirect répondant à la recherche « Industry 4.0 » par année. L'industrie 4.0 concerne l'implantation et l'exploitation d'un ensemble de groupes technologique que nous détaillons au CHAPITRE 3 .

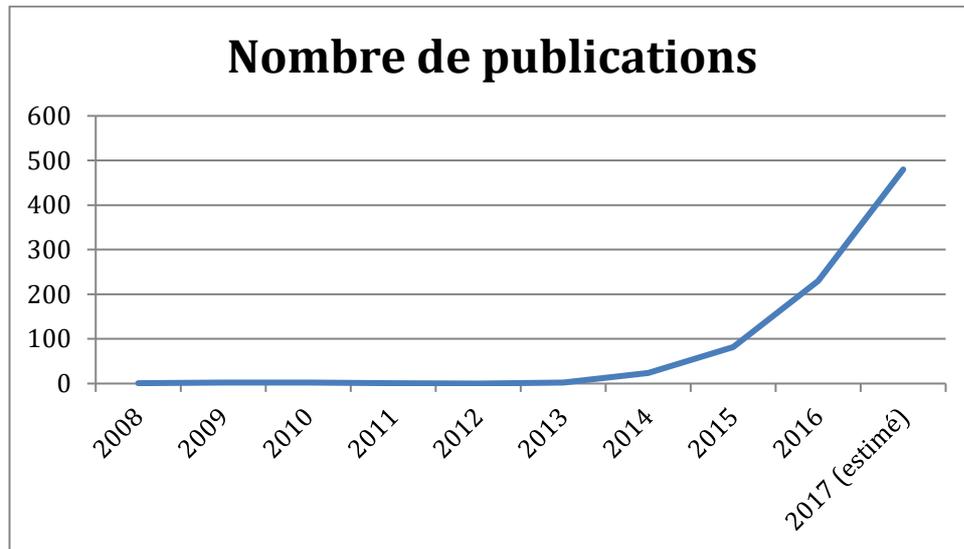


Figure 4 : Nombre de publications ScienceDirect répondant à "Industry 4.0"

En 1975, William J. ABERNATHY écrivait que le plus complexe se situe du côté de la diffusion et de l'exploitation des technologies innovantes plus que dans l'ingénierie (Abernathy and Townsend, 1975). L'un des enjeux de l'industrie 4.0 est d'exploiter des technologies au sein des entreprises en adaptant les organisations et les métiers. Ce problème était déjà présent lors des précédentes implantations technologiques telles que le CIM (Vassell, 1999) et les ERP (Ahmad and Pinedo Cuenca, 2013) notamment.

Cependant, toutes ces évolutions technologiques ne signifient pas nécessairement une progression économique importante. Les coûts d'investissement dans l'industrie 4.0 sont importants, il est nécessaire de ne pas tomber dans le « paradoxe de la productivité » (Brynjolfsson, 1993; Skinner, 1986). Parmi les enjeux de recherche, il faut vérifier que les capitaux supplémentaires investis par les entreprises sont à la mesure des retours sur investissements attendus. L'aspect économique de l'industrie 4.0 est un risque à lever et un intérêt à confirmer.

L'un des enjeux de notre recherche est de favoriser la diffusion et de transmettre l'intérêt de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME.

Nous avons positionné ici notre travail de recherche dans le cadre du Génie industriel avec des liens d'intérêt pour les sciences de gestion et les sciences sociales. Nous avons également montré les enjeux économiques, sociétaux et de recherche de notre étude.

Dans le chapitre suivant, nous détaillons les caractéristiques des PME et le pilotage industriel.

CHAPITRE 2

Les PME et le pilotage industriel

2.1 INTRODUCTION

Dans cette partie, nous définissons et nous caractérisons les PME. Nous visons à proposer aux PME des solutions innovantes pour le pilotage industriel à l'aide des outils de l'industrie 4.0, ainsi il est important de cerner les caractéristiques propres de ces entreprises.

Dans une première partie, après avoir donné la définition des « PME », nous présentons la PME comme une entreprise en cours de croissance, passant de la « start-up » à l'ETI puis au statut de grande entreprise. Par la suite, nous analysons les caractéristiques managériales des PME dans le but d'en appréhender les différences avec les grandes entreprises. Ainsi, nous présentons les forces et les faiblesses des PME face au marché et à leur proposition de valeur.

Dans une seconde partie, nous analysons quelques exemples d'outils de pilotage industriel. Dans un premier exemple, nous présentons le Lean Manufacturing au sein des PME, nous montrons les forces et faiblesses des PME face à ce paradigme. Ensuite, nous présentons l'exploitation d'outils informatiques tels que les ERP dans les PME.

En conclusion, nous montrons pourquoi l'industrie 4.0 apporte de nouveaux paradigmes et l'intérêt que cela présente pour les PME.

2.2 PME : DEFINITIONS ET CARACTERISTIQUES

2.2.1 DEFINITIONS DES PME

Il est nécessaire de donner ici la définition des « PME » que nous utilisons dans le cadre de cette recherche. En effet, suivant les pays, les définitions varient. Par exemple, au Canada une PME est une entreprise dont le nombre d'employés est compris entre 1 et 499 salariés et dont le CA ne dépasse pas 50 millions de \$ canadiens.

En France cependant, la définition des « PME » est régie par la Loi de Modernisation de l'Économie du 4 août 2008 (Décret d'application n°2008-1354, article 51). Les PME regroupent les entreprises qui occupent plus de 10 salariés et moins de 250 personnes, et qui ont un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions d'euros ou un total de bilan n'excédant pas 43 millions d'euros. Les entreprises ayant moins de 10 salariés sont des TPE (Très Petites Entreprises) et les entreprises ayant plus de 250 salariés, mais moins de 5000 sont des ETI (Entreprises de Taille Intermédiaire). Enfin, les entreprises ayant plus de 5000 employés sont les Grandes Entreprises (GE).

En moyenne en France, les PME comptent un peu plus de 25 employés. 60 % des PME sont constituées de moins de 20 salariés et seulement 11% atteignent ou dépassent les 50 salariés. Parmi les ETI, 23 % sont constituées de moins de 250 salariés, mais sont considérées comme ETI sur des critères de CA ou de bilan.

En 2012, Louis GALLOIS remettait son rapport au Premier ministre français sur la compétitivité de l'industrie française (Gallois, 2012). Il constatait que les PME souffraient de faiblesses importantes, notamment : manque de fond propre, difficulté à ouvrir le capital, peur du manque de gestion, peur du risque d'investissement. Ces faiblesses sont accentuées par les résultats de l'industrie de ces dix dernières années. En effet, entre 2007 et 2012, le nombre de défaillances de PME est passé de 3 100 par an à 4 600 par an. Sur la même période, les PME ont vu fondre leur marge brute de plus de 6 points, passant de plus de 25 % en 2007 à moins de 19 % en 2009.

Cependant, les PME ne doivent pas simplement être considérées par les chiffres afférant à leur définition. Elles représentent des organisations avec des caractéristiques spécifiques que nous décrivons dans les sous-sections suivantes.

2.2.2 CARACTERISTIQUES MANAGERIALES DES PME

Dans cette section, nous présentons les caractéristiques des PME. Afin de cerner ces entreprises et leur environnement particulier, nous ne pouvons pas simplement nous appuyer sur les chiffres énoncés précédemment, nous faisons appel aux recherches entreprises au sein des sciences de gestion afin de caractériser ces entreprises sur le plan managérial et organisationnel.

Ainsi, nous situons la PME au sein du processus de croissance des entreprises. Puis nous exploitons les travaux de Henry MINTZBERG pour présenter les modes de coordinations qui régissent ces entreprises. Enfin, nous synthétisons l'ensemble des caractéristiques identifiées.

2.2.2.1 ENTREPRISES EN CROISSANCE, LA SITUATION DES PME

Pour Michel BAUER les PME sont « *vues comme de grandes entreprises en réduction, cela est bien sûr faux, par contre la majorité des grandes entreprises sont d'anciennes PME* » (Bauer, 1999). De même, plus de la moitié des ETI actuelles étaient des PME il y a dix ans.

Ainsi, une PME est une entreprise en croissance, issues d'une start-up qui a grandi. Larry GREINER propose une modélisation de la croissance des PME à travers l'alternance de phase de croissance et de crise de transformation de l'entreprise comme l'illustre la Figure 5 (Greiner, 1972). Bien que L. GREINER ne précise pas les tailles des entreprises dans chacune des phases, ce modèle nous permet de situer les PME et de retrouver dans le descriptif des différentes phases l'environnement des PME.

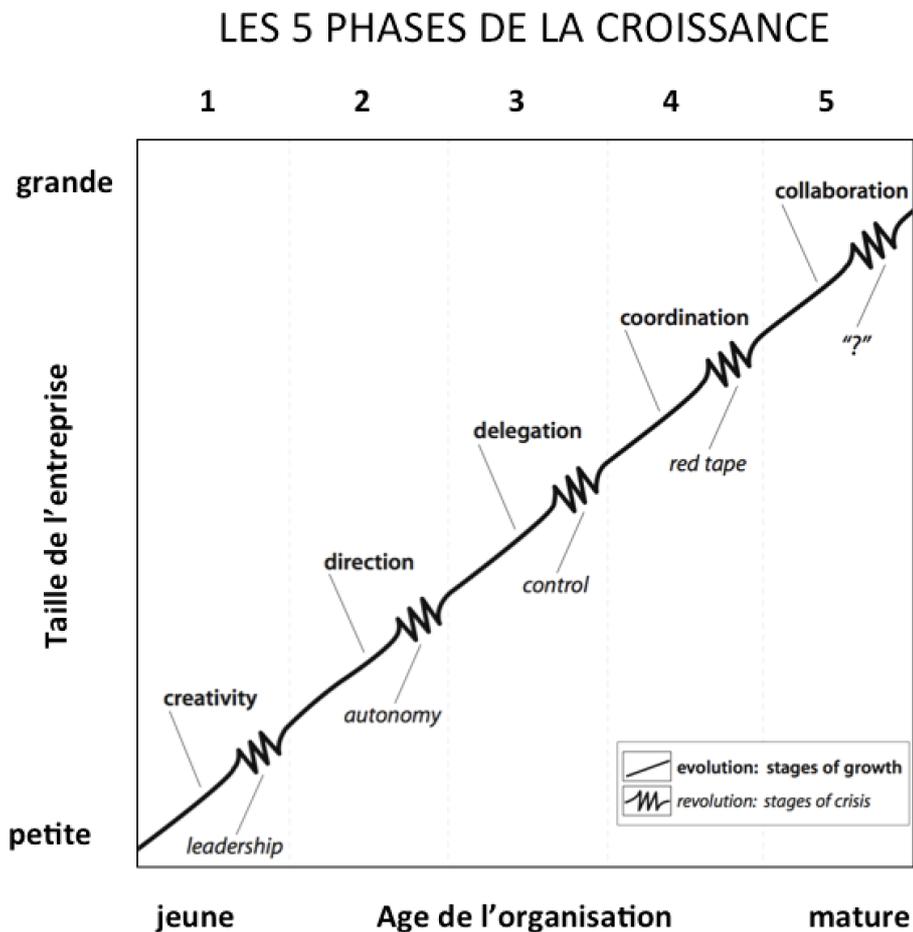


Figure 5 : modélisation de la croissance des entreprises par L. GREINER

- Phase 1 : la phase de création

Lors de cette phase, l'entreprise se présente sous forme d'une start-up. Cette phase est caractérisée par une forte créativité qui vise à définir un produit ou un service et qui cherche ses potentiels clients. Les dirigeants de l'entreprise, bien souvent les fondateurs, sont des techniciens et des entrepreneurs. Leurs activités consistent principalement à la conception et à la vente de produit.

Ainsi, ils ne se préoccupent pas des fonctions de management de l'entreprise. Les fondateurs ne comptent pas les heures passées au travail, contre une rémunération faible, mais avec des perspectives de croissance liée à l'activité. Les décisions sont prises en temps réel en fonction des retours des primoacquérants. La communication entre les employés est fréquente et informelle.

Une fois que l'entreprise atteint un seuil de chiffre d'affaires, des connaissances concernant les fonctions supports sont nécessaires, telles que la gestion de production, la logistique, l'informatique, etc. De même, la croissance du nombre d'employés ne permet plus un mode de communication informelle. Enfin, l'entreprise a besoin de plus de capitaux pour assurer son développement. Les fondateurs se retrouvent démunis face à ces nouveaux problèmes de management de l'entreprise, et la première crise de croissance émerge : *la crise de Leadership*. Qui va diriger l'entreprise et la sortir de cette difficulté ?

- Phase 2 : la phase de Direction

Les entreprises qui passent la première crise se retrouvent dans une situation de management très dirigiste et verticalisé. Ainsi, les fonctions sont définies et spécialisées, un système de gestion des inventaires et des achats est mis en place, la communication devient plus formelle en suivant les positions hiérarchiques de chacun. Enfin, le dirigeant et ses principaux adjoints centralisent l'ensemble du pouvoir décisionnel de l'entreprise, interférant dans l'ensemble des décisions opérationnelles de l'entreprise.

Avec le phénomène de croissance, les dirigeants s'éloignent des activités opérationnelles et des employés de niveaux hiérarchiques inférieurs. Les dirigeants sont de moins en moins capables de prendre l'ensemble des décisions qui régissent la vie opérationnelle de l'entreprise. Cependant, les dirigeants n'arrivent pas toujours à laisser les décisions être prises par les employés de niveaux hiérarchiques inférieurs : la seconde crise émerge, il s'agit de *la crise d'autonomie*.

- Phase 3 : la phase de Délégation

Les entreprises ayant franchi la crise d'autonomie continuent leur croissance suivant une phase de délégation. Cette phase décentralise la prise de décision. L'entreprise laisse plus de latitude décisionnelle aux dirigeants de centre de production et de centre d'affaires, l'entreprise utilise des bonus sur les centres de coûts pour motiver ses employés, les dirigeants de l'entreprise animent à partir de rapport d'activité comportant des indicateurs de performance, les dirigeants se focalisent sur l'acquisition d'entreprise visant à étendre leur activité, la communication avec les dirigeants est rare.

La phase de délégation assure aux dirigeants des centres de production une latitude décisionnelle importante, ce qui leur permet de répondre rapidement à toutes les demandes du marché qu'ils considèrent comme vecteur de croissance.

D'autre part, les gestionnaires locaux sont autonomes et possèdent une vision locale de l'activité. Ainsi, ils se détachent de la stratégie générale de l'entreprise définie par les dirigeants, préférant leur propre décision locale. L'entreprise va alors connaître sa troisième crise, *la crise de contrôle*. Les dirigeants de l'entreprise vont chercher à reprendre la direction des antennes locales et vont encadrer fortement toutes les initiatives possibles.

- **Phase 4 : la phase de Coordination**

Suite à la crise de contrôle, les entreprises doivent trouver de nouveaux modes de coordination visant à faire travailler l'ensemble de la structure maintenant grande que constitue l'entreprise. Dans cette phase, l'entreprise définit un ensemble de standards visant à faciliter la communication et la coordination entre les différentes entités, l'entreprise instaure des routines de revues des processus pour assurer le respect de ceux-ci. L'entreprise va également structurer son offre par groupe de produits, gérer une comptabilité analytique en vue de mesurer la performance de chaque groupe de produit. Enfin, l'entreprise va centraliser certaines fonctions de prise de décision stratégique et tactique, tout en maintenant les décisions opérationnelles sur les centres de production (limitant l'initiative à l'aide des processus définis).

L'éloignement des dirigeants provoque rapidement une incompréhension grandissante avec les cadres des centres de production. Les objectifs des dirigeants se retrouvent rapidement remis en cause par la vision locale des cadres. D'une part, les procédures standard deviennent trop lourdes et manquent de réactivité, d'autre part les différences entre les centres de production ne permettent plus de définir des standards répondant à la recherche de performance de chacun. L'entreprise va alors vivre sa quatrième crise, *la crise bureaucratique*.

- **Phase 5 la phase de Collaboration**

Les processus formels sont remplacés par un contrôle social et une autodiscipline visant à laisser plus d'autonomie à l'initiative locale tout en l'encadrant. Cette ultime phase présente une approche plus flexible et comportementale du management. La structure de l'entreprise devient définitivement matricielle, les fonctions expertes sont regroupées en mode projet ciblant des objectifs nécessitant de multiples compétences. Les formations sont organisées pour transmettre les bonnes pratiques et ainsi assurer un contrôle de l'organisation. Des réunions sont organi-

sées entre les cadres clefs de l'entreprise pour partager les problèmes et construire des équipes de résolution. Un système de remontée de l'information en temps réel est constitué et favorise la prise de décision.

Nous avons synthétisé et représenté les différentes phases dans le Tableau 2. Selon les observations d'Olivier TORRES (Torres, 1999), nous avons mis en gras les caractéristiques des PME et nous pouvons ainsi conclure que les PME se situent entre les phases 1 et 2.

Catégorie	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Phase 5
activité des dirigeants	fabriquer et vendre	rendre efficace les opérations	s'étendre	consolider l'organisation	résoudre les problèmes et innover
structure organisationnelle	informelle	centralisée et fonctionnelle	décentralisée et géographique	par groupe de produit	matriciel
type de dirigeant	individuel et entrepreneuriat	directif	délégation	contrôleur	participation
système de contrôle	retour du marché	standardisation et centre de coût	KPI* et centre de coût	budget et plan d'investissement	objectif commun à l'équipe
type de récompense	dirigeant propriétaire	salaire et mérite	bonus individuel	partage des bénéfices et actionariat	bonus lié à l'équipe

Tableau 2 : caractéristiques des entreprises en fonction des phases de croissance (d'après L. GREINER, 1972)

*KPI : *Key Performance Indicator*, tableau de bord comportant les indicateurs de performance clef de l'entreprise et/ou du secteur.

La PME est donc dans une *phase de direction*, avec souvent un dirigeant très fort et impliqué dans les décisions opérationnelles, il s'agit parfois d'un des fondateurs historiques de l'entreprise, mais dans d'autres cas il peut également s'agir d'un cadre placé par les actionnaires lors de la crise de Leadership.

2.2.2.2 TYPES DE DIRIGEANTS DE PME FACE A LA CROISSANCE

Menée sur une base de dix-neuf questions considérées comme les plus discriminantes, une analyse typologique a permis de faire apparaître cinq classes de dirigeants dans leur position face à la croissance (Chevalier, 2014).

- **le « velléitaire de la croissance » (13 % de l'échantillon)**

Il dirige une société bien établie (plus de 30 ans d'âge et 100 à 250 employés) dont la croissance sur les trois dernières années a été plus tôt moyenne (inférieur à 15 %). Son objectif est de faire croître son entreprise, quitte à perdre le leadership et à devoir déléguer nombre de responsabilités. Les difficultés rencontrées ne lui semblent jamais complexes, il adapte sa structure au fur et à mesure de la croissance de son organisation.

- **l'objecteur de croissance (17 % de l'échantillon)**

Il est l'actionnaire majoritaire de son entreprise de moins de 50 personnes et d'un CA situé entre 7 M€ et 15 M€. Il refuse la croissance, ne voulant pas perdre son pouvoir décisionnel et déléguer les responsabilités. Une croissance supérieure nécessitera trop de changement complexe pour l'organisation, il ne compte donc pas aller plus loin.

- **L'idéologue de la faible croissance (17 % de l'échantillon)**

Il est à la tête d'une société solide de plus de 30 ans et de 100 à 250 salariés, dont la croissance récente ne s'établit qu'entre 5 et 15 %. Pour lui, la délégation, l'adaptation des structures, la complexité croissance de l'organisation ne sont que des difficultés moyennes. Cependant, il trouve la stabilité confortable et ne comprend pas pourquoi la croissance est si intéressante. Ainsi, il préfère privilégier la rentabilité et l'autonomie en conservant « son petit rythme ».

- **Le performant tranquille (32 % de l'échantillon)**

Pas de problèmes pour "le performant tranquille", il sort tout juste d'une croissance de quelques années à plus de 30 % par an. Les changements organisationnels, l'adaptation à d'autres marchés ne sont pas des difficultés pour lui. Cependant, il souhaite ralentir pour grandir « raisonnablement », c.-à-d. la croissance sera à l'avenir plus proche de 20% que des 30%.

- **Le fanatique réaliste (21 % de l'échantillon)**

Sa société est un peu plus jeune que les autres et emploie entre 50 et 100 personnes. On retrouve ce profil dans tous les rythmes de croissance. Pour lui la croissance est à tous les égards une excellente chose. Mais il sait qu'il est plus facile de le dire que de le faire, il s'est frotté au problème et parle en connaissance de cause. Il se dit prêt à ralentir pour ne pas prendre trop de risque.

Ainsi dans cette étude qui surreprésente les PME en croissance, seuls 32 % des dirigeants (les performants tranquilles) recherchent réellement et savent gérer la croissance. Ainsi, les PME varient en termes de volonté de croissance, cependant nous notons que le dirigeant en est le principal facteur clef lié à la centralisation du pouvoir et à l'aspect « instinctif » de sa stratégie.

2.2.2.3 MODES DE COORDINATION DANS UNE PME

La modélisation de Henry MINTZBERG se décompose en deux éléments, « la structure d'une organisation peut être définie simplement comme la somme totale des moyens employés pour diviser le travail entre tâches distinctes et pour ensuite assurer la coordination nécessaire entre ces tâches. » (Mintzberg, 1982). Ainsi, il décrit les deux éléments de l'organisation :

- les composantes de structure de l'organisation ; et
- les modes de coordination de ces différentes composantes.

Tout d'abord, dans sa modélisation illustrée par la Figure 6, Henry MINTZBERG distingue cinq composantes qui forment la base de l'organisation :

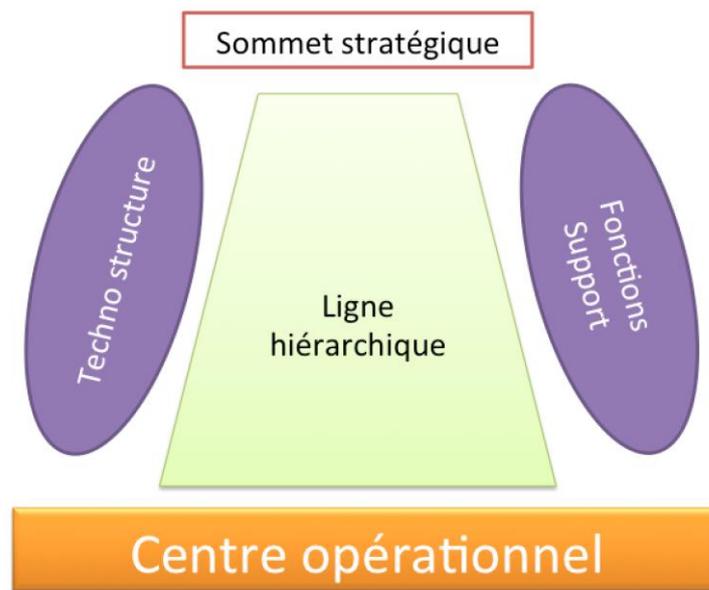


Figure 6 : modélisation d'une organisation d'après H. MINTZBERG

- **le centre opérationnel** : il se compose des membres de l'organisation – les opérateurs – dont le travail est directement lié à la production de biens et de services. Le centre opérationnel est le cœur de l'entreprise, c'est cette composante qui génère la valeur ajoutée et permet à l'organisation de créer les produits ou services à destination des clients. Les opérateurs du centre opérationnel accomplissent 4 tâches essentielles ils :
 - se procurent ce qui est nécessaire à la production ;
 - assurent la fabrication proprement dite ;
 - distribuent les produits et les services ; et
 - assurent les fonctions de support direct aux divers stades de production.
- **le sommet stratégique** : il se compose des membres de l'organisation qui sont chargés des plus larges responsabilités. La fonction du sommet stratégique est de faire en sorte que l'organisation remplisse sa mission de façon efficace, et qu'elle serve les besoins de ceux qui contrôlent l'organisation ou qui ont sur elle du pouvoir (les actionnaires par exemple).
- **la ligne hiérarchique** : elle fait le lien entre le sommet stratégique et le centre opérationnel. Elle se compose des cadres situés directement en dessous du sommet stratégique et descend jusqu'aux cadres première

ligne de l'entreprise ayant autorité sur les opérateurs du centre opérationnel.

- **la technostructure** : elle se compose des analystes, c.-à-d. des employés responsables d'analyser et d'adapter les standards pour optimiser le travail des autres. On distingue trois types de standardisation correspondant aux trois sortes d'analystes :
 - les analystes du travail (les fonctions méthodes) qui standardise les procédés de travail du centre opérationnel ;
 - les analystes de planification et de contrôle qui standardisent les résultats ; et
 - les analystes du personnel qui standardisent les qualifications.
- **les fonctions de support logistique** : elle se compose de multiples fonctions qui procurent aux membres de l'entreprise des services nécessaires à leur activité. On y trouve notamment les services juridiques, le restaurant d'entreprise, la recherche et développement, la gestion de la paie.

Au sein d'une PME, le dirigeant est proche du centre opérationnel du fait de la petite taille de l'entreprise. D'autant plus lorsque le dirigeant est un des fondateurs, il s'implique dans les décisions de la technostructure autant que sur le centre opérationnel directement. Ainsi, selon le modèle de H. MINTZBERG décrit ci-dessous, la PME se caractérise par une hiérarchie courte (Figure 7).

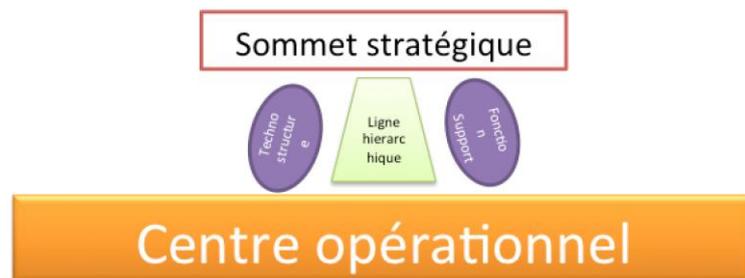


Figure 7 : modélisation d'une PME selon le modèle de H. MINTZBERG

Ensuite, Henry MINTZBERG décrit les modes de coordination qui régissent les organisations.

Il distingue cinq modes :

- **l'ajustement mutuel** : il réalise la coordination du travail par simple communication informelle. Du fait de sa simplicité, ce mode de coordination

est utilisé par les organisations les plus simples. D'autre part, il laisse une grande liberté aux opérateurs du centre opérationnel pour s'organiser.

- **la supervision directe** : elle est le mécanisme de coordination par lequel une personne se trouve investie de la responsabilité du travail des autres. Le responsable donne le travail et contrôle la réalisation du travail demandé.
- **la standardisation des procédés** : il s'agit de standardiser le contenu du travail. Il s'agit de mode de coordination que l'on retrouve sur les chaînes de production, les employés n'ont pas à se préoccuper du travail des autres, des analystes ayant défini les tâches de chacun afin qu'elles soient coordonnées.
- **la standardisation des résultats** : il est également possible de standardiser les résultats du travail (par exemple en spécifiant à l'avance les dimensions d'un produit, ou la performance à atteindre). C'est le mode de coordination des chauffeurs de taxi par exemple, le client n'impose qu'une seule chose : la destination, le chauffeur ayant pour objectif d'atteindre la destination dans un délai acceptable pour le client en toute sécurité.
- **la standardisation des qualifications** : il s'agit de standardiser la formation et le savoir de celui qui exécute le travail. Par exemple, lorsqu'un chirurgien et un anesthésiste se trouvent dans une salle d'opération, ils ont à peine besoin de communiquer, la formation reçue leur permet de connaître avec exactitude les rôles et responsabilités de chacun ainsi que les tâches qui leur sont assignées.

MINTZBERG montre qu'il existe une continuité entre les différents modes de coordination. À mesure que le travail d'organisation devient plus difficile, les moyens de coordination employés de façon préférentielle semblent passer successivement comme indiqué sur la Figure 8. Dans les situations les plus complexes où la standardisation ne parvient plus à répondre aux différents cas possibles, les organisations connaissent un retour à l'ajustement mutuel, mode de coordination plus agile.

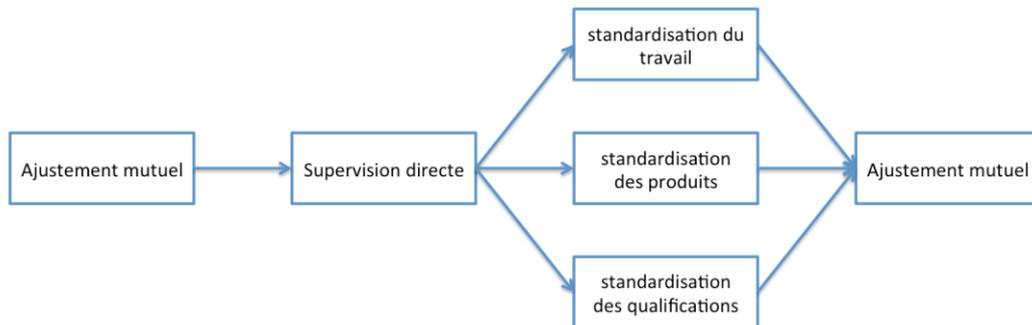


Figure 8 : continuum entre les mécanismes de coordination

À l'aide de cette modélisation, nous allons pouvoir présenter un portrait de la PME et définir ainsi ces caractéristiques managériales.

2.2.2.4 SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES

Suite aux différentes modélisations présentées, nous sommes en mesure de définir les caractéristiques managériales des PME.

Le premier point qui revient est la prépondérance du pouvoir centralisé du dirigeant. Ce dernier s'implique dans toutes les décisions de l'entreprise, principalement les décisions opérationnelles. Le corollaire de ce constat est un manque de temps consacré à la prise de décision stratégique de l'entreprise. Ainsi, le dirigeant dans la majorité des cas conserve une vision à courte vue de la stratégie de l'entreprise, plus proche de l'instinct que d'une réflexion poussée sur l'avenir de sa structure.

Autre élément, la prépondérance du dirigeant et son besoin de centraliser le pouvoir entraînent un manque de délégation des décisions et un manque de décomposition fonctionnelle de son organisation. Les fonctions expertes peinent à se développer, elles sont contraintes de répondre aux attentes d'un dirigeant souvent moins expert qu'elles et en général n'acceptent pas cette situation. Nous faisons référence ici à la crise d'autonomie décrite par GREINER. Sans croissance de la structure, les fonctions expertes quittent rapidement l'entreprise et la PME stagne sans fonctions expertes.

Un point qui ressort du fait de la petite taille de l'entreprise est la difficulté à accéder à des investissements importants. Cependant, ceci est contrasté par une étude menée sur les PME 2010 par KPMG, « Les PME qui grandissent » ; cette étude met en lumière le rôle clef du dirigeant dans les PME en croissance. Ainsi il semblerait que dans les périodes critiques en matière de prévision économique, les entreprises familiales sont déterminées à jouer la carte de la croissance. Ainsi,

certes les PME n'ont pas toujours les moyens à la hauteur des grandes entreprises, mais elles ne manquent pas d'ambition et de volonté d'investissement.

Le fait que le dirigeant soit proche du terrain permet également un management de proximité, ainsi le dirigeant est en capacité d'insuffler la passion du développement à ses équipes avec facilité. A contrario, si le dirigeant ne souhaite pas le développement, il sera le principal élément bloquant à toute tentative de changement de son organisation.

Enfin, comme l'a identifié F. CHEVALIER, la performance de l'entreprise et la croissance de l'entreprise sont très dépendantes du dirigeant et du type de dirigeant de l'entreprise.

2.2.3 CONCLUSION CONCERNANT LES PME

Nous avons étudié les différents modes de coordination qui régissent les organisations, puis nous avons distingué les modes de coordinations spécifiques des PME. Nous avons également situé la PME au sein de l'évolution d'une entreprise au cours de sa croissance afin d'en tirer des conclusions concernant les caractéristiques managériales qui régissent les PME illustrées en Figure 9. Enfin, nous avons montré que les dirigeants de PME sont prépondérants dans ces entreprises, que cela implique plusieurs corollaires, dont la stratégie à courte vue.

Les PME sont des univers particuliers, bien distincts des grandes entreprises, il nous semblait important d'en décrire les aspects.

Lors de nos recherches, nous avons tout d'abord étudié le Lean Manufacturing au sein des PME comme moyen de pilotage industriel. Suite aux différents constats que nous avons faits, nous avons orienté nos travaux sur l'exploitation de l'industrie 4.0 que nous traitons au chapitre suivant. Nous allons compléter ce chapitre en décrivant quelques cas de pilotage de PME via le Lean et les ERP-MES afin de cerner les difficultés rencontrées par ces entreprises.



Figure 9 : les caractéristiques managériales des PME

2.3 PILOTAGE INDUSTRIEL DES PME

Dans cette section, nous abordons plusieurs méthodes et outils de pilotage des PME afin de conclure notre présentation de ces structures. Nous présentons le Lean Manufacturing dans les PME, puis les ERP-MES dans les PME.

Dans une première partie, nous abordons le Lean Manufacturing au sein des PME. Après avoir donné un bref descriptif du Lean Manufacturing, nous étudions les cas concrets issus de la littérature dans le but d'identifier les forces et faiblesses des PME. Ainsi, nous montrons pourquoi la majorité des implantations Lean dans les PME sont considérées comme des échecs. Cette analyse des forces et faiblesses des PME face au Lean Manufacturing a fait l'objet d'une publication en conférence de recherche MIM2016 (Moeuf et al., 2016).

Dans une seconde partie, nous montrons que les ERP ne sont pas toujours adaptés aux PME.

Nous concluons en discutant de l'attrait de l'industrie 4.0 comme nouvelle solution potentielle pour le pilotage industriel des PME.

2.3.1 LEAN MANUFACTURING DANS LES PME

Le terme Lean est utilisé pour la première fois lors de l'*International Motor Vehicle Program*, visant à comprendre les écarts de productivité entre l'industrie japonaise et l'industrie occidentale. Le terme Lean est ensuite popularisé par Womack et al. (1990). Le *Lean Manufacturing* trouve ses racines dans le Toyota Production System (1988) ; dans les années 1950, Taiichi OHNO constate les deux limites du Fordisme : d'une part la production par lot important implique une gestion coûteuse des stocks et des en-cours et d'autre part l'incapacité des industries à répondre à l'attente des clients concernant la diversité de l'offre comme l'illustre le modèle Ford T qui ne se faisait qu'en noir.

Le *Lean Manufacturing* est un ensemble de principes managériaux qui visent à la suppression de l'ensemble des gaspillages tout au long de la chaîne de valeur, un gaspillage étant un bien ou un service pour lequel le client n'est pas prêt à payer. Womack et al. (2003) présentent des entreprises ayant implanté le Lean Manufacturing et ayant obtenu des gains opérationnels importants : diminution des délais de fabrication de 60 %, diminution des stocks de 70 % et diminution des défauts de fabrication de 55%. Pour supprimer les gaspillages, il existe un ensemble d'outils *Lean*, citons par exemple le 5S², le SMED³ ou encore le Kaizen⁴. Plusieurs auteurs ont travaillé à la classification des outils *Lean* en fonction de leurs caractéristiques (Pettersen, 2008), mais le Lean Manufacturing n'est pas qu'une boîte à outils.

Cependant, l'implantation du *Lean Manufacturing* n'est pas simple, « de nombreuses entreprises entreprennent ce type de démarche pour optimiser leur performance opérationnelle, force est de constater que, dans la majorité des cas, les

² 5 S sont les initiales des cinq opérations de base indispensables pour rationaliser les tâches: Débarrasser, Ranger, Nettoyer, Standardiser, Eduquer & discipliner.

³ La méthode SMED a pour objet de réduire le temps d'un changement de série et de permettre ainsi de réduire la taille de lot minimale. SMED est l'abréviation de l'anglais single-minute exchange of die.

⁴ Le mot kaizen est la fusion des deux mots japonais kai et zen qui signifient respectivement « changement » et « meilleur ». La traduction française courante est « amélioration continue ».

améliorations ne sont pas robustes. Après avoir nécessité des efforts considérables et mobilisés de nombreuses ressources, leur effet se réduit dès que l'encadrement a relâché un tant soit peu son attention et sa pression » (Drew et al., 2004). En Angleterre, l'implantation du *Lean Manufacturing* est considérée comme une réussite dans moins de 10 % des cas (Baker, 2002). Les méthodes d'implantation sont issues majoritairement de la production de masse adaptée aux grandes entreprises (Åhlström, 1998; Hobbs, 2011; Mostafa et al., 2013). Les caractéristiques particulières des PME ne permettent pas d'appliquer ces méthodes, nous avons donc décidé de comparer les principes managériaux du *Lean Manufacturing* et les caractéristiques des PME afin d'identifier les forces et faiblesses des PME face au *Lean*.

Ainsi, Liker (2007) propose une liste de 14 critères managériaux pour l'application du *Lean Manufacturing*. Nous avons croisé ces 14 critères managériaux avec les caractéristiques des PME identifiés dans la section précédente. Nous avons identifié les forces et faiblesses des PME face au *Lean Manufacturing*.

Le détail de l'étude a fait l'objet de plusieurs publications en conférence internationale (Moeuf et al., 2016, 2015). Les résultats sont importants :

- le manque d'expertise est la caractéristique la plus en conflit avec les principes managériaux du *Lean Manufacturing* ;
- le manque de procédure et de méthodes ainsi que la stratégie courte vue sont également fortement en conflit ; et
- le management de proximité est une caractéristique qui présente un conflit principalement avec le risque de stratégie courte vue, la prise de décision consensuelle (et non centralisé sur le dirigeant), l'amélioration continue, la standardisation des tâches.

Lors de notre étude, nous avons également constaté que sur les 23 articles analysés, 16 articles notaient le manque de ressource comme une faiblesse des PME. Cependant, lorsque nous avons croisé les principes managériaux du *Lean Manufacturing* avec les caractéristiques managériales des PME, le manque de ressources ne représente pas une contrainte importante.

Le *Lean Manufacturing*, bien qu'ayant montré de nombreux résultats positifs dans les grandes entreprises, ne semble pas adapté aux PME. Négligées, les PME ont cherché à copier cette méthode adaptée au monde de la production de masse et des grandes entreprises, la majorité des échecs provient d'une sous-considération des caractéristiques propres des PME. D'autre part, le *Lean Manufacturing* n'est

pas initialement prévu pour être associé à une offre importante de produit différent, la majorité des cas d'application dans les secteurs automobile et aéronautique se focaliser sur une personnalisation des produits autour d'un standard (comme la voiture par exemple), les PME semblent avoir des modèles d'affaires plus diversifiées et nécessitant une grande flexibilité. Les taux d'échecs constatés et les conflits entre caractéristiques managériales et principes du Lean nous poussent à envisager une autre méthodologie d'amélioration de la performance.

2.3.2 L'ERP DANS LES PME

Pour améliorer la performance industrielle des entreprises, l'une des méthodes est d'exploiter efficacement les ressources à disposition, c'est l'objet des outils ERP (Cragg and Mills, 2011; Yang and Su, 2009). Les ERP (*Enterprise Resource Planning*), appelés progiciel de gestion intégré (PGI), sont des applications informatiques dont le but est de coordonner l'ensemble des activités d'une organisation autour d'un système d'information global (Baglin et al., 2015).

Les ERP sont issus des premiers progiciels de gestion industrielle qui étaient fondés sur la logique MRP de planification des flux et des stocks de matières (*Material Requirements Planning*), eux-mêmes ayant étendu progressivement leur champ d'application à l'ensemble de la planification des ressources de production, appelé MRPII (*Manufacturing Resource Planning*). Par la suite, les progiciels prirent en charge l'ensemble des processus de l'entreprise et non plus ceux relevant exclusivement de la gestion industrielle, ainsi naquit les ERP.

Les recherches concernant les ERP se focalisent principalement sur les grandes entreprises, primo acquérant de ces systèmes (Loh and Koh, 2004), il y a peu de littérature concernant les ERP dans les PME (Haddara and Zach, 2011).

Les changements issus de l'implantation d'un ERP sont de différente nature (Al-Mashari, 2002) :

- stratégie de l'entreprise ;
- technologique ;
- culture industrielle ;
- système de management ; et
- ressources humaines.

Les travaux d'Ifenedo (2007) montrent qu'il existe une relation entre la structure d'une entreprise et le taux de réussite de l'implantation de l'ERP, plus l'entreprise

est grande, plus le taux de réussite est important. Les travaux de Nandi et Kumar (2016) montrent qu'une centralisation faible du pouvoir décisionnel dans l'organisation favorise l'implantation d'un ERP. Les PME sont des entreprises où, au contraire, le pouvoir décisionnel est très centralisé entre les mains du dirigeant.

Les ERP tels qu'ils sont connus sont complexes et coûteux à implanter dans les petites structures (Deep et al., 2008). En effet, les travaux de Ahmad et Cuenca (2013) montrent que 80 % des facteurs de succès sont des facteurs organisationnels. Un conflit évident apparaît entre, d'un côté les critères managériaux des PME (manque de décomposition fonctionnelle, manque de procédure et méthodes, manque de formalisation des processus) et de l'autre côté les implications d'un ERP (management des processus, structuration organisationnelle).

Enfin, les ERP présentent une importante rigidité dans leur structure et dans leur fonctionnement (Cullinan et al., 2010). Or les PME présentent des profils flexibles avec une capacité à s'adapter rapidement aux nouvelles contraintes des marchés, et à saisir les opportunités rapidement. Certaines études montrent des taux d'échecs lors de projet ERP avoisinant les 50 % (Doom et al., 2010).

Les ERP ne répondent donc pas à l'ensemble des besoins et des contraintes des PME. Ainsi, nous visons à identifier si l'industrie 4.0 présente une opportunité différente et mieux adaptée aux PME.

2.3.3 INDUSTRIE 4.0 : UNE NOUVELLE SOLUTION ?

Plusieurs solutions ont déjà montré leur faiblesse dans les PME, notamment le Lean Manufacturing et les ERP comme nous l'avons vu précédemment.

Pourquoi l'industrie 4.0 serait-elle différente ?

Plusieurs éléments de réponses peuvent être apportés. Tout d'abord, l'industrie 4.0 vise à plus de flexibilité et plus de liens avec les clients. Il s'agit ici de qualités qui animent les PME, l'industrie 4.0 ne devrait pas imposer des contraintes contraaires aux forces des PME.

Les nouvelles technologies sont beaucoup plus accessibles que d'autre concept. Lorsque l'on souhaite exploiter le Lean Manufacturing par exemple, il faut repenser et reconfigurer complètement le modèle de production de l'entreprise pour passer sur une ligne de production notamment. Cette transformation est coûteuse et très complexe sur le plan industriel. De même, les ERP imposent des architectures de données rigides et complexes, figeant l'organisation. Les coûts engendrés

par ces projets sont importants. L'industrie 4.0 présente des atouts liés à la maturité et l'accessibilité des technologies exploitées, le Cloud Computing par exemple permet de mettre en relation les entreprises à travers des modules simples et peu coûteux, donc accessibles aux entreprises comme les PME en manque de fonction experte.

De même, certains modules de l'industrie 4.0 sont indépendants, par exemple la technologie RFID permet de tracer les déplacements physiques des produits sans nécessiter un investissement important.

L'industrie 4.0 favorise la coordination des entreprises par le partage d'information ; cette coordination favorise les investissements dans l'outil industriel, car c'est toute la supply chain qui s'aligne sur des objectifs communs.

Enfin, les états se lancent dans un accompagnement sans précédent des industriels et tout particulièrement des PME dans cette transformation numérique. Par exemple la France a lancé le plan « Nouvelle France Industrielle » dont l'industrie du futur est le premier des piliers. Sur la page d'accueil du gouvernement français, il est fait mention notamment de l'intérêt de l'industrie du futur pour les PME (ministère de l'Économie, 2017).

Dans le chapitre suivant, nous définissons les concepts d'industrie 4.0 avant de faire un état des connaissances académiques des cas d'application de l'industrie 4.0 dans les PME.

CHAPITRE 3

État de l'art – les PME à l'ère de l'industrie 4.0

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'état des connaissances scientifiques relatives à l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME. Pour cela, nous présentons tout d'abord le concept d'industrie 4.0 et nous montrerons qu'il existe un grand nombre de définitions différentes de ce concept. Nous présenterons et justifions la définition exploitée pour nos travaux de recherche.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons défini un cadre d'analyse de la littérature scientifique adapté des travaux de M. PORTER, L. RAYMOND et du Boston Consulting Group. Nous avons exploité ce cadre d'analyse pour guider notre revue des articles issus de notre recherche bibliographique. Nous présentons notre stratégie de revue de la littérature avant d'analyser les articles identifiés.

Notre revue de la littérature s'est focalisée sur les cas empiriques d'exploitation de l'industrie 4.0 dans les PME, nous avons montré que les PME considéraient l'industrie 4.0 comme une potentielle optimisation de leur processus actuel, mais pas comme un vecteur de modification en profondeur de leur pilotage industriel visant à exploiter de nouveaux modèles d'affaires ouvrant ainsi de nouvelles opportunités.

Cette revue de la littérature scientifique a fait l'objet d'une publication dans IJPR (International Journal of Production Research) (Moeuf et al., 2017d).

Enfin, suite à cet état de l'art nous présentons la problématique de recherche en conclusion de ce chapitre.

3.2 INDUSTRIE 4.0

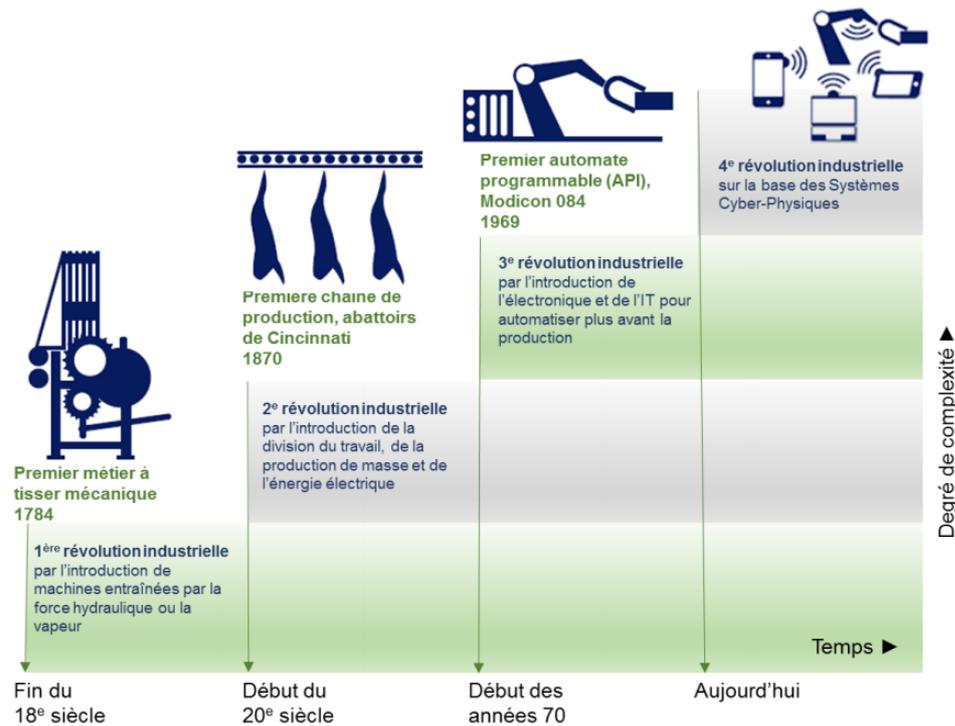
3.2.1 PRESENTATION DE L'INDUSTRIE 4.0

Depuis plusieurs années, de nouveaux outils numériques émergent ; l'IoT par exemple envahit nos quotidiens avec l'apparition de divers objets connectés tels que les montres, les balances connectées, les réfrigérateurs connectés pour ne citer qu'eux.

L'industrie 4.0 est un paradigme qui transcrit l'insertion de ces technologies dans le monde industriel. Les groupes technologiques tels que l'IoT (Dijkman et al., 2015), les algorithmes d'analyse de données massives (Babiceanu and Seker, 2016) ou encore le *Cloud Computing* (Xu, 2012) sont récemment entrés dans les entreprises industrielles et favorisent l'émergence de nouveaux concepts de pilotage des processus, de proposition de nouveaux services et de nouveaux produits (Moeuf et al., 2017a). Plusieurs initiatives stratégiques sont nées à travers le monde : le « *smart manufacturing* » aux États-Unis, « l'internet+ » en Chine, « l'industrie du futur » en France et « l'industrie 4.0 » en Allemagne. Le terme industrie 4.0 semble s'imposer au niveau international, nous avons décidé d'exploiter ce terme tout au long de nos travaux.

Ce concept est né à la foire d'Hanovre en 2011 suite à une discussion entre les représentants de l'industrie, de la recherche, des syndicats et de l'état. L'objectif premier de l'initiative allemande n'est pas d'augmenter l'automatisation des productions, mais de rendre plus intelligents les modes de production à travers la mise en réseau des machines et des hommes. Cela répond au besoin grandissant des clients d'obtenir des produits personnalisés, mais cela répond également à la peur qu'éprouvaient les industriels face aux géants de l'internet comme Google qui capte de plus en plus l'exclusivité de la relation client, monopolise l'accès à ses données d'usage et draine une part croissante au sein de la chaîne de création de valeur.

L'industrie 4.0 fait référence à la 4^e révolution industrielle, comme illustrée sur la Figure 10. La première révolution industrielle concerne la mécanisation de l'industrie à l'aide des machines à vapeur, la seconde révolution industrielle fut la mise en ligne de la production et l'utilisation de l'énergie électrique. La troisième révolution industrielle concerne l'exploitation des premiers automates programmables. L'industrie 4.0 vise à connecter l'ensemble des objets et intervenants tout au long de la chaîne de valeur au sein de l'usine de demain.



Source : ©DFKI, 2011

Figure 10 : les 4 stades de la révolution industrielle

Ainsi, l'industrie 4.0 permet l'intégration sur 3 axes de l'ensemble de la chaîne de valeur (Wang et al., 2016) :

- l'intégration horizontale : tout au long de la chaîne de valeur, les machines et les hommes communiquent en temps réel directement sur le centre opérationnel. Les entreprises sont également connectées entre elles favorisant les réseaux et les partenariats industriels (Song et al., 2014) ;
- l'intégration verticale : le pilotage des systèmes et sous-systèmes à travers la flexibilité et la reconfiguration des réseaux de production ; et
- l'intégration temporelle : tout au long du cycle de vie du produit, les objets connectés enregistrent des données de conception, fabrication et utilisation des produits.

Pour viser ces différentes intégrations, l'industrie 4.0 se base sur plusieurs caractéristiques listées par le parlement européen :

- l'interopérabilité des objets, des machines, des humains et des systèmes informatiques qui communiquent entre eux (Wang and Xu, 2013) ;

- la virtualisation du monde physique à travers une copie dans le monde virtuel à partir des données collectées par les capteurs (Terkaj et al., 2015);
- la décentralisation de la prise de décision directement sur les CPS au plus près de la production (Lee et al., 2015);
- la gestion de la capacité et de la charge en temps réel à travers la collecte et l'analyse de données, la simulation et les changements de priorité (Michniewicz and Reinhart, 2016);
- "l'orientation service" pour enrichir l'offre proposée aux clients (Bonfanti et al., 2015); et
- la modularité des systèmes de production permettant une flexibilité accrue répondant aux fluctuations de la demande (Seiger et al., 2015).

L'association des télécommunications allemandes BITKOM a trouvé en 2013 plus de 100 définitions différentes du concept d'industrie 4.0 (Bidet-Mayer, 2016). Malgré de forts consensus sur les principes, il n'est pas aisé de donner une définition de l'industrie 4.0 qui fasse consensus, par exemple Trappey et al. (2016) définissent l'industrie 4.0 comme un concept général visant à rendre plus intelligente la fabrication à l'aide de techniques et de technologies telles que l'internet des objets, le *cloud computing* et le *big data*. Pour Schumachet et al. (2016), l'industrie 4.0 fait référence aux avancées technologiques récentes où l'internet et les technologies (comme les systèmes embarqués par exemple) servent de support de base à l'intégration d'objets physiques, d'acteurs humains, de machines intelligentes, de lignes de produits et de processus à travers les limites de l'organisation pour former un nouveau type de réseau intelligent et des chaînes de valeurs agiles. Le CEFRIO donne une définition plus globale, basé sur une étude approfondie de la littérature, où l'industrie 4.0 regroupe un ensemble d'initiative pour l'amélioration des processus, des produits et des services permettant des décisions décentralisées basées sur l'acquisition de données en temps réel.

Il existe ainsi trois stratégies de passage vers l'industrie 4.0 comme l'illustrent la Figure 11, les produits, le service et les processus.

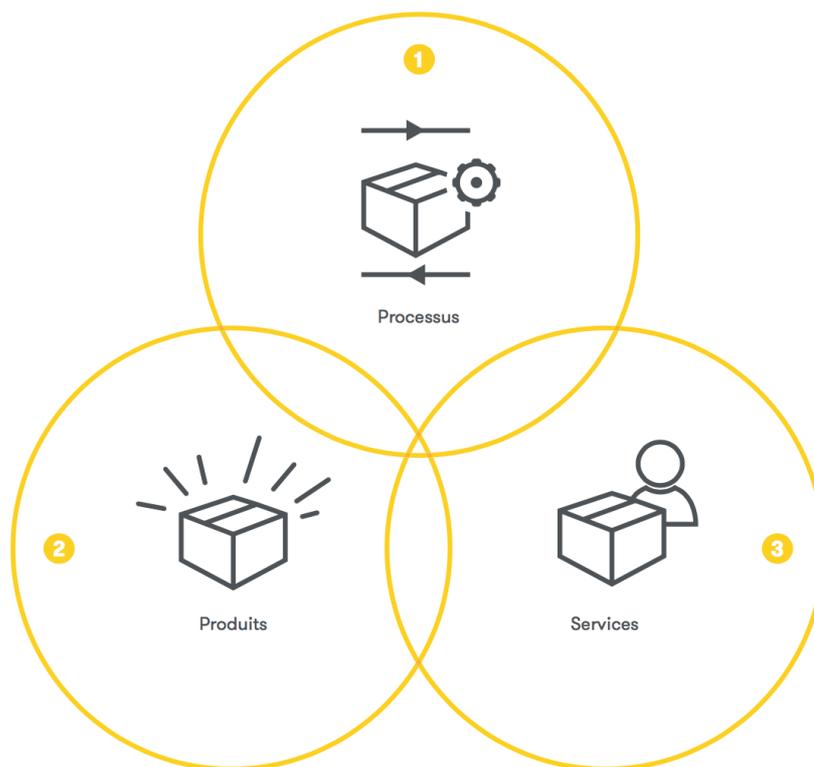


Figure 11 : les stratégies de passage vers l'industrie 4.0, source CEFRIO

Dans le cadre de nos travaux, nous étudions le pilotage industriel des PME, ainsi nous orientons notre approche vers les processus de l'entreprise. Parmi l'ensemble des définitions existantes, nous avons donc sélectionné celle qui nous semblait la plus pertinente dans notre périmètre de recherche :

L'industrie 4.0 est une approche du pilotage industriel visant la synchronisation en temps réel des flux et la production unitaire et personnalisée de produit à la demande des clients.

À l'origine de ce concept, il y a l'émergence de nouvelles technologies que nous regroupons sous le terme de moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0. Nous détaillons ces moyens de mise-en-œuvre dans la section suivante.

3.2.2 GROUPES TECHNOLOGIQUES DE L'INDUSTRIE 4.0

Nous présentons dans cette partie les différents groupes technologiques de l'industrie 4.0 représentés sur la Figure 12. Pour cela, nous avons exploité une liste de 9 groupes technologiques proposée par le Boston Consulting Group (Ruessmann et al., 2015).

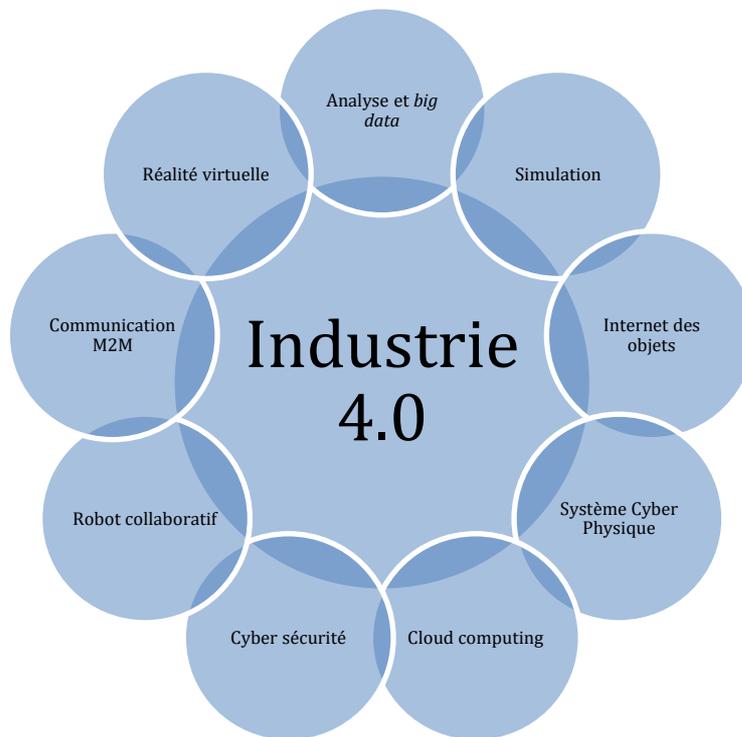


Figure 12 : les groupes technologiques supports de l'industrie 4.0

- **L'analyse de données massives (*Big Data and Data Analytics*)**

L'analyse de données massives a été initiée par les géants du web tel que Google. L'objectif de Google était d'indexer les pages internet et de relier la demande d'un utilisateur aux pages internet les plus susceptibles de répondre à son attente. Pour cela, Google a mis au point la plateforme Hadoop (Bao et al., 2012) de calcul et un l'algorithme MapReduce (Dean and Ghemawat, 2008) permettant de paralléliser les calculs et ainsi de traiter une masse importante de données.

Il est complexe de quantifier à partir de quelles quantités de données nous parlons de Big Data. Toutefois, il s'agit d'une valeur entre la taille d'un disque dur (2 To) et la taille d'un *centre de données* (100 To). Sur un *centre de données* de 100 To, il faut plus de 10 jours pour lire l'ensemble des données à raison de 100 Mo/s.

Dans le cas d'analyse de données de moindre quantité, nous parlerons également de *data analytics* qui visent à identifier de la valeur exploitable dans la masse de données disponibles (Bi and Cochran, 2014).

- **la simulation**

L'intégration des différents outils informatiques permet de modéliser et de simuler les performances du système de production (Caggiano et al., 2015; Caggiano and Teti, 2013; Luo et al., 2011). Les outils de modélisation permettent d'analyser le comportement du produit, la performance des lignes de production et la coordination des réseaux multi sites, ce qui conduit à l'optimisation de tous les processus industriels (Azevedo and Almeida, 2011; Matsuda et al., 2016; Mehrsai et al., 2014; Veza et al., 2015).

- **L'internet des objets (IoT : *Internet Of Things*)**

Les nouvelles technologies de l'information, la miniaturisation des objets informatiques et la baisse des consommations énergétiques permettent d'incorporer des capacités de communication aux différents objets physiques (Kopacek, 2015; Wang et al., 2015). La communication en temps réel des objets physiques permet de contrôler l'état des produits ou des systèmes et de faciliter la décentralisation de la prise de décision face à un aléa.

- **les systèmes cyber physique (CPS : *Cyber Physical System*)**

Ces mécanismes permettent la surveillance et le contrôle à l'aide de capacité de communication, de stockage de données et de calcul directement incorporés aux objets. Ainsi les objets peuvent communiquer avec leur environnement et se reconfigurer, ou participer activement à la reconfiguration du système, en temps réel en réponse à un nouveau besoin (Yue et al., 2015).

- ***Cloud Computing***

La communication et l'échange d'informations peuvent être facilement développés grâce à l'utilisation de technologies de cloud computing en fournissant des moyens faciles de connectivité réseau. En pratique, des données et des applicatifs sont proposés via un accès réseau type internet, c'est ce que propose Google avec la suite Gsuite qui comprend un stockage de données sur le Google Drive, un éditeur de texte via Google Doc et plusieurs autres applicatifs. Le Cloud Computing facilite le travail collaboratif en proposant un service de mise à disposition d'un réseau de stockage et des outils, garantissant les compatibilités entre les applicatifs. Avec un temps de réaction de quelques millisecondes et de grandes largeurs de bande passante, le partage d'informations sur de multiples systèmes et réseaux en temps réel devient une réalité. Autre avantage, les données et les applicatifs ne sont pas dépendants du support d'accès, ainsi Google Sheets fonctionne sur n'importe quel support informatique (*smartphone*, tablette, ordinateur avec un système d'exploitation Mac ou Microsoft).

- **La réalité virtuelle**

Dans notre quotidien, deux outils ont fait leur apparition dans la réalité virtuelle. Par exemple les casques prévus initialement pour les jeux vidéo comme le Playstation VR de Sony ou l'Oculus Rift de Facebook. Également envisagé un temps puis abandonné il y a deux ans, le projet Google Glasses visait à proposer une paire de lunettes en intégrant à la vue de l'utilisateur un ensemble d'information. Cependant, en 2017, Google revient avec un projet uniquement à destination des entreprises.

La capacité de ce groupe technologique à donner accès en temps réel aux données nécessaires à différentes opérations ouvre de nouvelles perspectives ; l'objectif peut être de faire apparaître à la vue de l'opérateur les gestes à faire pour conduire une opération donnée. Ainsi, il est possible de superposer dans la vision de l'utilisateur des objets réels issus de sa vision « classique » et des objets virtuels ajoutés informatiquement (Lee et al., 2011).

- **la cyber sécurité**

L'industrie 4.0 et plus généralement la révolution numérique des communications laissent transiter une grande quantité de données entre différents sites physiques. L'émergence du *cloud computing* par exemple est un vecteur de transit numérique important. Ainsi, il est important de permettre aux utilisateurs et aux industriels de garantir que les données qui sont stockées et qui transitent sur le réseau ne soient pas vulnérables. Il s'agit d'un point crucial pour le déploiement de la stratégie Industrie 4.0 (Holtewert et al., 2013; Ryu et al., 2009; Wells et al., 2014).

- **la communication machine à machine (*communication M2M*)**

La communication machine à machine permet de faciliter les échanges directement entre les machines d'un parc pouvant être de dimension importante. Ainsi, l'ensemble du système de production peut se reconfigurer et réagir à un aléa détecté (Wang and Wang, 2016).

- **les robots collaboratifs**

Parfois appelés Cobot (*Collaborative Robot*), ces robots ne sont pas des automates programmables capables de reproduire avec précision une opération définie, ils sont capables d'interagir avec un opérateur, l'accompagnant dans sa tâche. Ainsi, un humain peut utiliser des outils de plusieurs centaines de kilogrammes sans risque ni difficulté particulière, le bras robot complétant l'effort de l'opérateur dans ses mouvements (Khalid et al., 2016; Trebuña et al., 2014).

La base de l'industrie 4.0 est une exploitation de ces groupes technologiques que nous appelons des moyens de mise-en-œuvre. Ces technologies sont aujourd'hui disponibles et accessibles, parfois à des coûts et des niveaux de développement différents. L'objectif est d'exploiter ces groupes technologies en vue de faire doter les systèmes de production de nouvelles capacités. Nous adaptons dans la section suivante les travaux de M. PORTER sur l'internet des objets dans le but de transcrire ces nouvelles possibilités pour les systèmes pilotés.

3.2.3 CAPACITES MANAGERIALES POUR LE PILOTAGE DE SYSTEMES DE PRODUCTION

Il existe différentes capacités managériales pour le pilotage de systèmes de production. A partir des travaux de M. PORTER, nous avons identifié 4 capacités managériales pour l'industrie 4.0. Ces différentes capacités managériales sont illustrées dans la Figure 13.

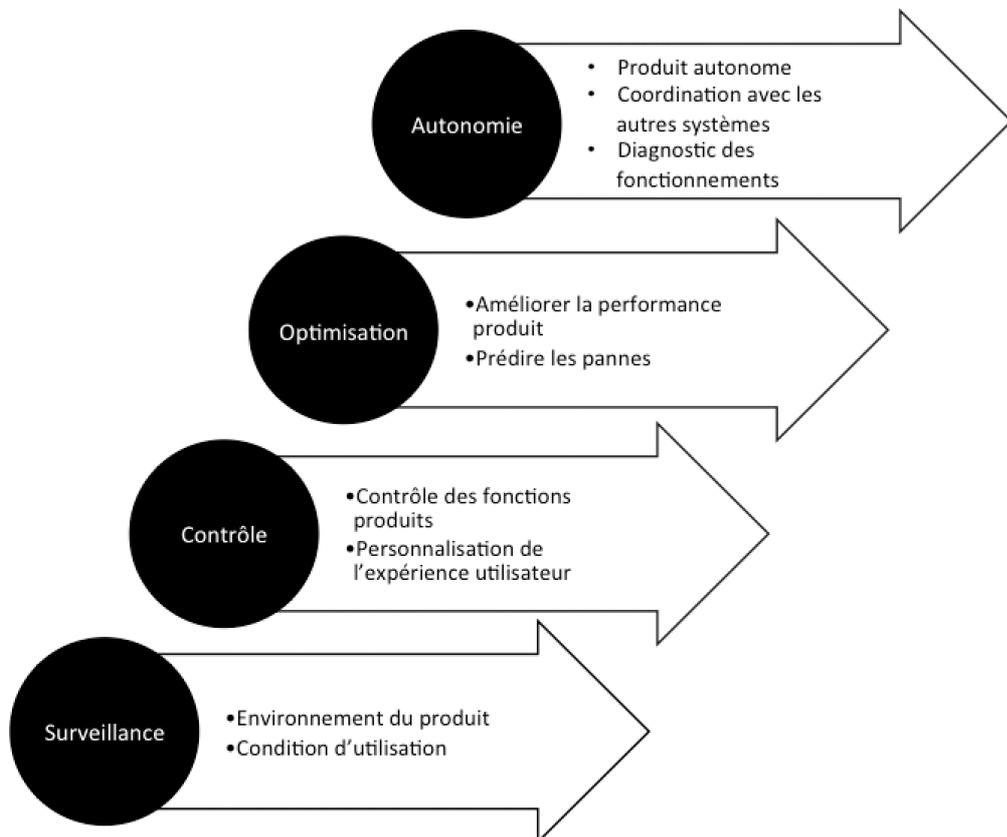


Figure 13 : 4 capacités managériales du pilotage de système

Ces 4 capacités managériales sont imbriquées, par exemple le contrôle implique une maîtrise de la surveillance. De même, l'optimisation intègre le contrôle et donc la surveillance. Enfin, l'autonomie du système de production intègre une capacité d'optimisation.

- **la surveillance**

La surveillance globale du système de production et de son environnement peut être réalisée par exploitation des objets connectés par exemple. Différents éléments de production peuvent ainsi générer une alerte et des notifications en cas de changement de situation ou d'écart détecté.

- **le contrôle**

En fonction d'un historique de données, du comportement standard du système et des performances attendues, les algorithmes peuvent être utilisés pour détecter les situations nécessitant une décision par une alerte ou une notification. Le contrôle englobe donc la surveillance en incorporant une boucle de prise de décision (Aruväli et al., 2014; Cao et al., 2011).

- **l'optimisation**

En utilisant les tableaux de bord, la modélisation de système et la simulation, l'exploitation des ressources et les performances industrielles peuvent être optimisées en temps réel. De même, la synchronisation de tous les acteurs de la chaîne de valeur peut ainsi être plus performante globalement qu'en cumulant les optimaux locaux (Horbach et al., 2011; Mauricio-Moreno et al., 2015).

- **l'autonomie**

La surveillance des systèmes, les boucles de contrôle et de prise de décision, les optimisations en temps réel peuvent être combinées pour rendre le système autonome (Khalid et al., 2016). Ainsi, l'ensemble des ressources peut être coordonné sans intervention verticalisée, par un partage horizontal de l'information et de la prise de décision. Le système est également capable « d'apprendre » des résultats liés aux décisions passées, ou de réagir de manière optimale à un changement du besoin (Bagheri et al., 2015; Delen et al., 2013).

Les moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0 et les capacités managériales obtenues doivent permettre de répondre à des objectifs de performance industrielle. Nous présentons dans la section suivante les critères de performance que nous avons sélectionnés pour organiser notre revue de la littérature.

3.2.4 OBJECTIFS DE PERFORMANCES OPERATIONNELLES

L'exploitation des nouvelles technologies ainsi que les capacités managériales qui en découlent doivent apporter aux entreprises des gains industriels. Afin de s'assurer d'une telle amélioration, il est nécessaire de mesurer l'impact de toute démarche d'amélioration à l'aide de critères quantitatifs représentatifs de la stratégie des entreprises. Raymond (2005) propose une liste de critères de performance que les PME peuvent voir progresser à l'aide de l'exploitation des nouvelles technologies du numérique :

- amélioration de la flexibilité ;
- réduction des coûts ;
- amélioration de la productivité ; et
- amélioration de la qualité.

Dans le cadre de leurs travaux sur l'adoption des nouvelles technologies, Bayo-Moriones, Billon and Lera-Lopez (2013) proposent une liste de critères similaires en ajoutant la notion de réduction des délais perçus par les clients.

Nous avons considéré ces critères de performance pour notre cadre d'analyse afin de vérifier si, dans la littérature, ces différents critères progressent à l'aide de l'exploitation de l'industrie 4.0. La liste exhaustive est :

- flexibilité ;
- réduction des coûts ;
- amélioration de la productivité ;
- amélioration de la qualité ; et
- réduction des délais.

Nous détaillons le cadre d'analyse complet au sein de la sous-section suivante.

3.2.5 CADRE D'ANALYSE DE LA LITTERATURE SCIENTIFIQUE

Il existe une relation forte entre les moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0, les capacités managériales et la performance opérationnelle obtenue. Nous avons exploité ces trois éléments pour définir notre cadre d'analyse de la littérature illustré en Figure 14.

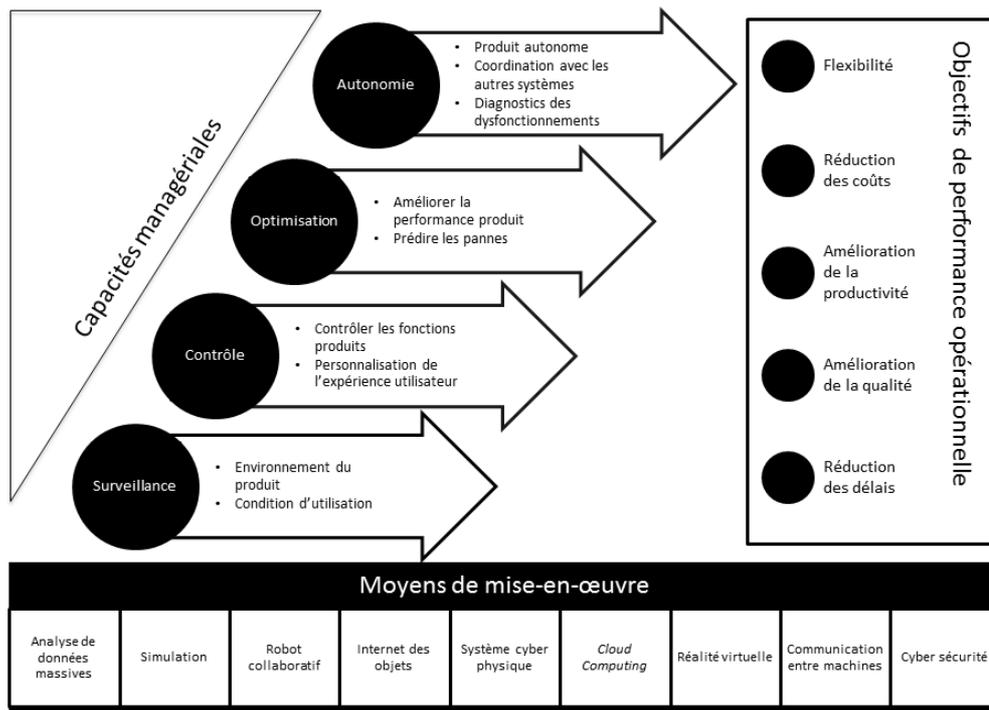


Figure 14 : cadre d'analyse de la littérature scientifique

Nous exploitons ce cadre dans la section suivante qui décrit la revue de littérature effectuée.

3.3 ÉTAT DE L'ART : L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PME

Nous décrivons dans cette section la stratégie de revue de littérature, l'analyse des articles identifiée et les conclusions que nous avons déduites. Nous exploitons pour cela le cadre d'analyse défini dans la section précédente.

Notre objectif est d'identifier dans la littérature les cas d'application de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME.

3.3.1 STRATEGIE DE REVUE DE LA LITTERATURE

Pour atteindre nos objectifs de recherche, il est nécessaire d'effectuer un état des connaissances par le biais d'une revue de littérature complète. Afin d'assurer cette revue de littérature, nous avons respecté la stratégie de revue de littérature de Tranfield et al. (2003). La méthode de sélection des articles de Tranfield assure à

la revue de littérature d'être reproductible. Contrairement à d'autres méthodes de revue de littérature (Adolphus, 2015; Seuring and Gold, 2012), Tranfield a étendue une méthode de revue de la littérature du secteur médical vers les sciences de gestion, cette méthode est donc claire et guide l'utilisateur dans sa recherche et l'analyse bibliographique. Enfin, cette méthode a déjà été exploitée et validée dans d'autres recherches bibliographiques concernant des PME (Garengo et al., 2005).

Comme illustré dans la Figure 15, nous avons effectué une recherche par mots clefs dans les bases de données suivantes :

- Elsevier (<http://www.sciencedirect.com/>);
- Emerald (<http://www.emeraldinsight.com/>);
- Springer (<http://www.springer.com/fr/>); et
- Taylor and Francis (<http://www.tandfonline.com/>).

Nous avons remarqué lors de lecture préliminaire que certains auteurs exploitaient des outils de l'industrie 4.0 pour influencer le pilotage industriel des PME, sans pour autant se référer au pilotage industriel. De même, des auteurs pouvaient discuter de pilotage industriel avec des outils de l'industrie 4.0 sans pour autant y faire référence. Nous avons donc séparé en plusieurs requêtes nos interrogations de bases de données, nous avons obtenu 2041 réponses avec 28 requêtes.

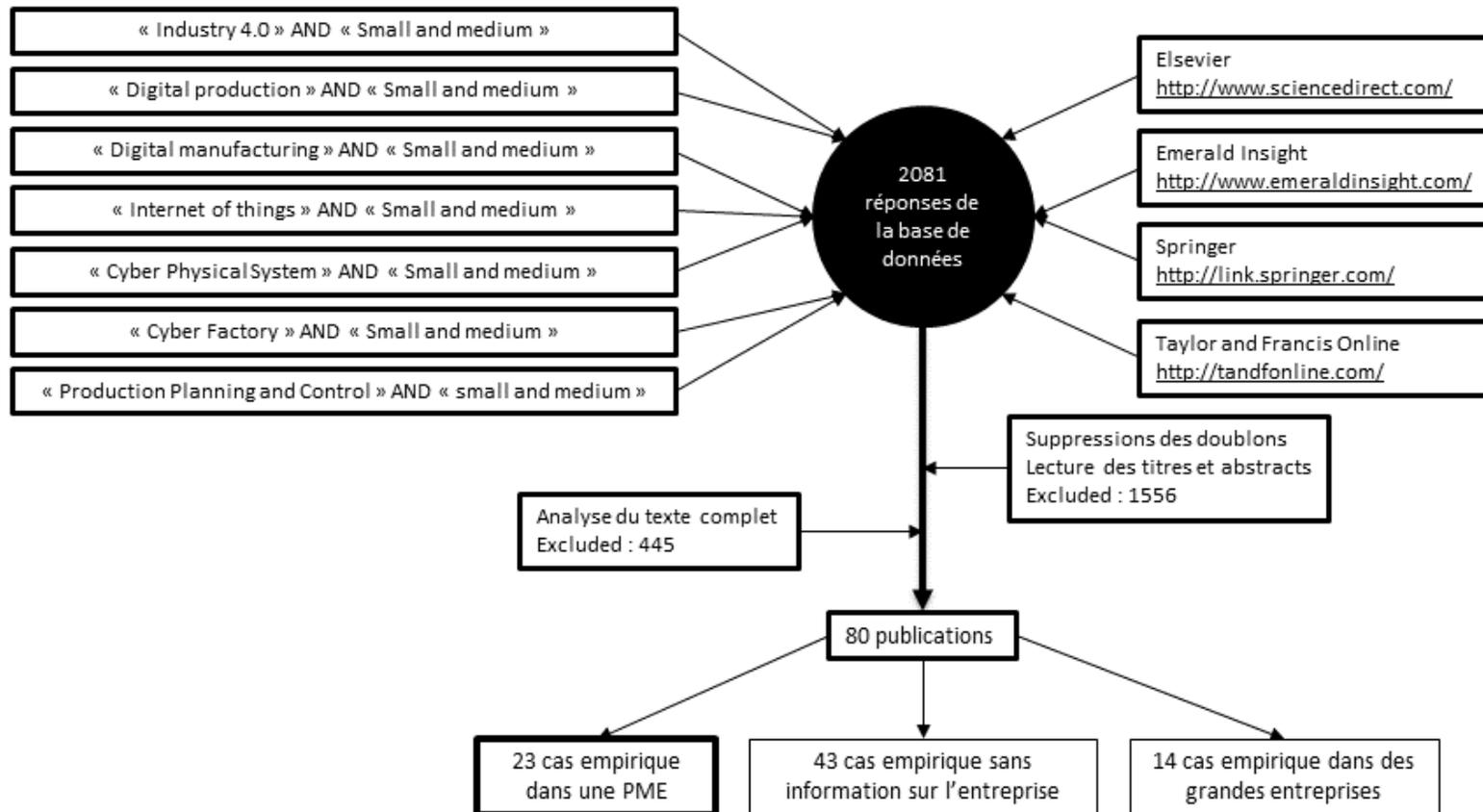


Figure 15 : stratégie de revue de la littérature

Après avoir supprimé les doublons et avoir lu les titres et résumés, plus de 1556 articles ont été supprimés de la liste. La lecture de l'ensemble des articles restants nous a permis d'isoler 23 cas empiriques d'utilisation de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME.

Nous avons obtenu également 43 cas dont nous n'avons pas pu trouver la catégorie de l'entreprise concernée, et 14 cas d'application sur des ETI ou de grandes entreprises.

Dans la section suivante, nous présentons l'analyse de la littérature effectuée sur les articles.

3.3.2 ANALYSE DE LA LITTÉRATURE

3.3.2.1 OBJECTIFS DE PERFORMANCE OPERATIONNELLE

Dans les articles sélectionnés, nous avons tout d'abord identifié les articles qui traitaient des objectifs de performance opérationnelle que nous avons sélectionnés. Comme le montre le Tableau 3, la flexibilité et l'amélioration de la productivité sont les objectifs les plus atteints.

	Flexibilité	Réduction des coûts	Amélioration de la productivité	Amélioration de la qualité	Réduction des délais
(Shamsuzzoha et al., 2016)	X				X
(Ren et al., 2015)	X		X		X
(Bonfanti et al., 2015)	X	X			X
(Huang et al., 2013)	X				
(Song et al., 2014)	X		X		
(Denkena et al., 2014)			X		X
(Barenji et al., 2016)			X		
(Peng et al., 2012)	X		X		
(Masood et al., 2013)	X				
(Sena Ferreira et al., 2012)	X				
(Herdon et al., 2012)	X				
(Chalal et al., 2015)	X	X			
(Fornasiero and Zangiacomi, 2013)	X				
(MacKerron et al., 2014)		X			
(Wang and Xu, 2013)	X	X			
(Xia et al., 2016)			X		
(Givehchi et al., 2015)			X		
(Constantinescu et al., 2014)	X				
(Dombrowski and Ernst, 2013)			X		X
(Segura Velandia et al., 2016)				X	
(Hao and Helo, 2015)			X		X
(Constantinescu et al., 2015)	X				
(Holtewert et al., 2013)	X				

Tableau 3 : article traitant des différents objectifs opérationnels

- la flexibilité

L'industrie 4.0 vise à synchroniser les flux tout au long de la supply chain. Pour cela, les entreprises doivent devenir flexibles afin de répondre rapidement à toute évolution du marché. L'utilisation des plateformes de *Cloud Computing* favorise la collaboration entre les entreprises et la capacité de réaction de l'ensemble de la chaîne de valeur aux fluctuations du marché (Shamsuzzoha et al., 2016).

Ren et al. (2015) soulignent que les PME doivent se concentrer sur leur expertise métier à l'intérieur d'un réseau d'entreprise répondant à la demande du client ; avec les outils favorisant la collaboration, les coûts de transaction entre les entreprises diminuent et permettent de se focaliser sur l'optimisation de son métier.

L'utilisation d'algorithmes d'optimisation de la planification de production peut améliorer la réactivité des entreprises. Par exemple, Peng et al. (2012) utilisent la génération de données en temps réel par le flux de production pour modifier le plan de production en cas de variation de la demande ou de la détection d'un aléa. De même, Chalal et al. (2015) séparent en deux sous-systèmes le modèle de simulation afin de modéliser indépendamment la demande et la production, cela permet d'améliorer la capacité à répondre à une demande de changement du client.

Enfin, Wang and Xu (2013) propose une solution pour favoriser le partage de données entre différents partenaires à travers une plateforme de *Cloud Computing*. Ils montrent que les problèmes principaux restent l'interopérabilité des systèmes et ils proposent un « *agent smart cloud* » qui facilite la recherche de solution d'interopérabilité pour les utilisateurs.

- **la réduction des coûts**

L'utilisation de la modélisation en trois dimensions par des artisans en Italie a permis une réduction significative des coûts de fabrication (Bonfanti et al., 2015). Les clients pouvaient ainsi commander leur produit à partir d'internet depuis n'importe quel endroit sur terre. Cette nouvelle relation avec les clients a accru fortement leur activité.

D'autres auteurs rapportent des réductions de coûts liés à la synchronisation des flux (Chalal et al., 2015; MacKerron et al., 2014). Un meilleur partage des informations entre client et fournisseur favorise la réduction des stocks par exemple.

- **amélioration de la productivité**

Givehchi et al. (2015) présentent une méthode d'optimisation de la séquence de travail d'un procédé d'usinage à l'aide d'un enrichissement du modèle de données correspondant au programme d'usinage. Cependant, le format de donnée n'est pas abordé.

Au niveau d'une usine, Dombrowski et Ernst (2013) simulent différents scénarios de croissance et regardent l'impact sur les flux afin d'optimiser et reconfigurer le système de production si nécessaire. Barenji et al. (2016) proposent un algorithme de calcul du plan de production prenant en compte les variations de la demande

client et les risques d'aléas internes. De la même manière, Ren et al. (2015) présentent un algorithme d'optimisation de production basé sur les données générées par des objets connectés, et optimisent ainsi la productivité de l'ensemble des partenaires (client – fournisseur) à l'aide d'une plateforme *Cloud Computing*.

L'amélioration de la productivité est gérée dans les articles au niveau des CPS, d'une usine ou d'un réseau multi site. Cependant, aucun article ne traite d'une optimisation en prenant en compte l'ensemble de ces trois niveaux.

- **l'amélioration de la qualité**

Segura Valendia et al. (2016) décrivent une utilisation de la technologie (RFID) visant à améliorer le contrôle qualité du processus de production. Pour cela, les auteurs exploitent les données historiques issues de ces mêmes capteurs et obtiennent une amélioration de la qualité des produits.

- **la réduction des délais**

L'utilisation des plateformes de Cloud Computing favorise les partenariats et la collaboration entre tous les partenaires des réseaux d'entreprises ; la synchronisation des flux entre tous les partenaires permet une réduction des délais (Ren et al., 2015; Shamsuzzoha et al., 2016).

La numérisation des besoins clients, par exemple en enregistrant une commande directement sur internet, accélère la gestion par les entreprises et favorise la réduction du délai perçu par le client. Bonfanti et al. (2015) montrent que des artisans italiens ont numérisé à travers la modélisation en trois dimensions les formes corporelles de leur client, ainsi ils peuvent fabriquer plus rapidement la réalisation des commandes à partir de ces formats numériques. Autre avantage, la conservation des données clients accélère la gestion des commandes suivantes.

Denkena et al. (2014) utilisent l'IoT en complémentarité du Lean Manufacturing en vue de réaliser une cartographie des flux de production. À l'aide des données obtenues, ils peuvent mesurer avec précision les temps d'attente à chaque poste, identifier les goulots d'étranglement et ainsi cibler les postes de travail à optimiser en priorité. Les auteurs concluent que l'entreprise a connu une baisse importante des délais.

En conclusion, l'industrie 4.0 semble avoir un impact positif sur plusieurs critères de performance opérationnelle. L'industrie 4.0 peut également être exploitée en complément de paradigme tel que le Lean Manufacturing (Moeuf et al., 2017c).

Cependant, l'amélioration de la qualité et la réduction des coûts ne sont présentes que dans peu de cas d'application, alors que l'amélioration de la productivité, des délais et la flexibilité sont très considérés. Dans la section suivante, nous analysons les capacités managériales qui ressortent des cas d'application identifiés.

3.3.2.2 CAPACITES MANAGERIALES

Comme indiqué dans le Tableau 4, nous avons indiqué dans les différents articles quelle capacité managériale était mise en œuvre. Il apparaît clairement un manque d'exploitation de l'autonomie des systèmes.

- **la surveillance**

La surveillance est la capacité managériale la plus simple à mettre en œuvre avec les technologies et les ressources de l'industrie 4.0. Par exemple, Denkena et al. (2014) exploitent l'IoT pour cartographier les processus en temps réel à l'aide de capteurs tout au long de la chaîne de production. Ces informations génèrent des alertes si un goulot ou des points de blocage se forment. Les alertes génèrent des actions d'amélioration continue. Toutefois, les auteurs précisent que les capteurs coûtent encore relativement cher, ce qui limite le nombre de points de mesure. Les travaux de Segura Velandia et al. (2016) présentent également l'utilisation de RFID intégrée directement dans les pièces et communicant avec les machines. Cela permet l'enregistrement tout au long du processus de production des données issues de l'environnement des pièces.

	Surveillance	Contrôle	Optimisation	Autonomie
(Shamsuzzoha et al., 2016)	X			
(Ren et al., 2015)	X			
(Bonfanti et al., 2015)	X			
(Huang et al., 2013)	X			
(Song et al., 2014)		X		
(Denkena et al., 2014)	X			
(Barenji et al., 2016)			X	
(Peng et al., 2012)			X	
(Masood et al., 2013)			X	
(Sena Ferreira et al., 2012)	X			
(Herdon et al., 2012)	X			
(Chalal et al., 2015)			X	
(Fornasiero and Zangiacomi, 2013)	X			
(MacKerron et al., 2014)		X		
(Wang and Xu, 2013)	X			
(Xia et al., 2016)		X		
(Givehchi et al., 2015)			X	
(Constantinescu et al., 2014)		X		
(Dombrowski and Ernst, 2013)			X	
(Segura Velandia et al., 2016)	X			
(Hao and Helo, 2015)	X			
(Constantinescu et al., 2015)		X		
(Holtewert et al., 2013)	X			

Tableau 4 : articles traitant des différentes capacités managériales

Pour Sena Ferreira et al. (2012), la surveillance peut fournir plusieurs indicateurs de performance. Utilisé au sein d'une entreprise virtuelle, c.-à-d. un groupement d'entreprises partenaires travaillant ensemble, le partage des données et des indicateurs favorise la confiance des partenaires. De même le suivi des données fournies par les objets connectés est utilisé par plusieurs chercheurs pour gérer les processus collaboratifs (Fornasiero and Zangiacomi, 2013; Huang et al., 2013;

Ren et al., 2015; Shamsuzzoha et al., 2016). Ces données sont traitées puis utilisées sous forme de tableau de bord en temps réel.

- **le contrôle**

Le contrôle favorise les interactions entre les employés et le système via les historiques de données et des seuils de déclenchement prédéterminés. MacKerron et al. (2014) a présenté un système e-kanban qui surveille les processus d'approvisionnement en utilisant la technologie RFID. Les changements dans les quantités consommées alertent les gestionnaires qui corrigent pour anticiper l'avenir.

Xia et al. (2016) propose d'utiliser les données de production pour comparer la performance des différents sous-systèmes et définir des niveaux de performance cible. Si le niveau n'est pas atteint, un nouveau projet d'amélioration est lancé pour modifier le sous-système de production concerné.

Les travaux de Constantinescu et al. (2015, 2014) se focalisent sur la mise à disposition d'informations pour la prise de décision en matière d'aide à l'utilisateur. Les différentes données acquises à partir des capteurs ont été liées à des tâches spécifiques ; lorsqu'un opérateur se lance dans une tâche, le système met à disposition de l'utilisateur les données nécessaires.

- **l'optimisation**

L'optimisation vise à améliorer les systèmes et les processus à l'aide d'approches numériques. Cependant, dans tous les cas de travaux d'optimisation dans les PME que nous avons identifiés ont été réalisés en effectuant la simulation des processus industriels actuels (Barenji et al., 2016; Chalal et al., 2015; Dombrowski and Ernst, 2013; Givehchi et al., 2015; Masood et al., 2013; Peng et al., 2012).

- **l'autonomie**

Nous n'avons identifié aucun cas d'application de l'autonomie de système. Cela n'est pas une surprise, cette capacité managériale requiert une implantation et l'exploitation de nombreuses technologies (Brad and Murar, 2015).

3.3.2.3 MOYENS DE MISE EN ŒUVRE DE L'INDUSTRIE 4.0

La revue de la littérature montre que seuls quelques groupes technologiques sont présents dans les PME ; le Cloud Computing et l'internet des objets sont les plus implantés et exploités dans les PME. Dans cette section, nous présentons une analyse détaillée de l'exploitation des différents groupes technologiques dans les articles, comme illustrée dans le Tableau 5.

	analyse big data	simulation		internet des objets		CPS	cloud computing					Réalité virtuelle	Cyber sécurité	Communication entre machines	Robot collaboratif
		optimisation de la planification	simulation de scénario	RFID	smart glasses		partage documentaire	servitization	collaboration	production distribuée	optimisation des ressources				
(Shamsuzzoha et al., 2016)				X			X	X	X						
(Ren et al., 2015)	X			X			X	X	X						
(Bonfanti et al., 2015)								X							
(Huang et al., 2013)				X			X	X	X						
(Song et al., 2014)															
(Denkena et al., 2014)				X											
(Barenji et al., 2016)		X													
(Peng et al., 2012)		X					X	X	X	X	X				
(Masood et al., 2013)			X												
(Sena Ferreira et al., 2012)				X			X		X						
(Herdon et al., 2012)								X							
(Chalal et al., 2015)		X													
(Fornasiero and Zangiacomi, 2013)							X	X	X	X					
(MacKerron et al., 2014)				X									X		
(Wang and Xu, 2013)							X	X	X	X					
(Xia et al., 2016)										X					
(Givehchi et al., 2015)		X				X					X				
(Constantinescu et al., 2014)		X									X				
(Dombrowski and Ernst, 2013)			X												
(Hao and Helo, 2015)					X					X	X				
(Segura Velandia et al., 2016)				X											
(Constantinescu et al., 2015)		X									X				
(Holtewert et al., 2013)							X	X	X				X		

Tableau 5 : Articles traitant des différents moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0

- **l'analyse de données massives (*Big Data*)**

Un seul article porte sur l'utilisation de l'analyse des données massives pour la planification ou le contrôle des processus de production. Ren et al. (2015) a proposé une plateforme *Cloud Computing* dédiée à la PME qui exploite des données à partir de l'internet des objets via l'algorithme MapReduce (Dean and Ghemawat, 2008) et la plateforme de calcul Hadoop (Bao et al., 2012).

Cependant, leur proposition n'a pas été mise en œuvre. Le manque de recherche dans ce domaine confirme l'observation de Bi et Cochran (Bi and Cochran, 2014) qui ont montré la faiblesse des PME en matière de recherche et développement et leur difficulté à gérer des solutions informatiques complexes. Ils ont souligné que le *Cloud Computing* est une solution viable pour les PME pour la fourniture de services analytiques et les moyens de structuration des données pour une utilisation potentielle de l'analyse des données massives.

- **la simulation**

Nous avons identifié deux catégories principales d'approches de simulation : l'ordonnancement des opérations et la simulation de scénarios. Dans la première catégorie, la simulation est principalement utilisée pour générer des programmes opérationnels en temps réel accessible en ligne. Dans la seconde catégorie, les modèles de simulation sont utilisés pour analyser et modifier les systèmes de production. Le Tableau 5 présente les différents cas empiriques suivant cette classification.

Selon les travaux de Chalal et al. (2015), certaines PME veulent améliorer leur offre commerciale en ajoutant des services en plus de leurs produits actuels. Ils ont proposé deux modèles de simulation connectés, permettant de reproduire d'un côté l'offre de service et de l'autre la simulation de la production. Ainsi, il est plus simple de simuler les deux modèles (plan de production et demande client) en vérifiant la bonne interaction entre eux.

Barenji et al. (2016) ont proposé la méthode PROMETHEUS pour développer une application de simulation de la planification. Les auteurs ont observé que les méthodes habituelles consistaient à prendre en compte uniquement la demande dynamique des clients ou les variations de production. Barenji et al. (2016) présentent une méthode qui a considéré les deux en même temps et qui correspond mieux à l'univers des PME.

Peng et al. (2012) s'appuie sur le déploiement d'une plateforme de *Cloud Manufacturing*. Ils présentent un algorithme conçu pour optimiser la gestion des ressources distribuées dans une situation collaborative, la plateforme de *Cloud Manufacturing* servant de support à l'entreprise virtuelle ainsi créée. Ils utilisent un algorithme hybride qui combine VNS (*Variable Neighborhood Search*) et PSO (*Particle Swarm Optimization*). Cette combinaison permet d'optimiser des problèmes multi objectifs pour une planification flexible dans un atelier de PME.

Givehchi et al. (2015) présentent une simulation pour optimiser l'usinage d'une pièce. Dans leur approche, les auteurs ont enrichi les données de la conception numérique de la pièce en y ajoutant de nouvelles valeurs enregistrées pour les CPS.

Masood et al. (2013) font remarquer que la planification des PME est souvent complexe à cause des nombreux processus et des compétences impliquées en réponse à une grande variété de produits. Ainsi, ils ont présenté le concept de DPU (*Dynamic Producer Unit*) destiné à modéliser le « rôle » d'une ressource afin d'en réaliser une répartition cohérente entre les employés, les machines et le système d'information. Le concept DPU peut être utilisé pour faciliter la modification des modèles en modifiant uniquement le « rôle » de la ressource impliquée dans la simulation. De cette façon, il est possible de simuler différents scénarios de systèmes de production et de prédire le comportement du futur système.

Enfin, Dombrowski et Ernst (2013) présentent une approche pour réaliser des simulations de scénarios en 6 étapes : le développement de différents scénarios, la conception des éventuels changements de lignes de production, les alternatives de modélisation, l'expérimentation et l'optimisation, l'évaluation des alternatives, la mise en œuvre de l'alternative choisie.

Parmi tous les articles identifiés, seuls Dombrowski et Ernst (2013) ont présenté un guide pratique pour la mise en œuvre dans une PME. Dans les autres cas, les équipes de recherche sont systématiquement les porteuses des projets de simulation sous forme de recherche-action.

- **l'IoT**

Comme nous le présentons dans le Tableau 5, plusieurs chercheurs utilisent l'IoT avec la technologie RFID pour obtenir des informations en provenance des flux de production en temps réel (Huang et al., 2013; MacKerron et al., 2014; Ren et al., 2015; Song et al., 2014). Ils montrent que la RFID et l'IoT améliorent la collaboration entre les PME au sein d'une entreprise virtuelle.

Dans ce sens, Sena Ferreira et al. (2012) proposent également plusieurs indicateurs de performance pour mesurer et valider la performance du système collaboratif dans son ensemble, c.-à-d. ils mesurent l'apport de chaque entité du réseau à la réussite de l'ensemble du réseau et non la performance uniquement locale d'une entité.

Denkena et al. (2014) montrent que la majorité des PME ne possèdent pas de données fiables. Ils proposent donc d'utiliser la RFID pour cartographier les flux de production lors d'une démarche d'implantation du Lean Manufacturing. Ce système permet d'obtenir rapidement des données fiables sur les flux de production et ainsi de cibler les initiatives d'amélioration continue à lancer en priorité, et ceux de manière plus rapide qu'avec une VSM (*Value Stream Mapping*) classique.

Xia et al. (2016) utilisent l'IoT pour récupérer les données d'une machine de production et pour analyser les performances et les déviations ; l'approche est associée à un programme d'amélioration continue. Segura Velandia et al. (2016) utilisent une approche similaire pour recueillir des données à partir de pièces produites. Dans les deux cas, l'internet des objets sert à acquérir des données pour évaluer le système de production.

Constantinescu et al. (2015, 2014) observent que l'IoT transmet trop de données pour que les humains puissent les traiter, les trier et en extraire de l'information facilement exploitable. Ils développent le JITIR (*Just In Time Information Retrieval*) composé de trois étapes : l'analyse des besoins par le biais d'entretiens avec les employés, le rétablissement de l'information et l'examen périodique de l'environnement de l'employé pour suivre tout besoin de changement, l'objectif est d'améliorer la qualité de la prise de décision.

Hao et Helo (2015) observent que la plupart des recherches portent sur l'utilisation de l'IoT pour améliorer l'automatisation et la flexibilité des organisations. Leur travail utilise une approche différente en se concentrant sur les liens homme-machine à travers les objets connectés. Utilisée en parallèle de la réalité virtuelle et du Cloud Computing, leur approche permet de relier les employés entre eux et d'optimiser l'accès aux fonctions expertes en cas de difficulté. Les principales approches de recherche dans ces articles sont de type recherche-action où les équipes de chercheurs portent les projets d'amélioration (Cappelletti, 2010).

- **les systèmes cyber physique**

Les travaux de Givehchi et al. (2015) sont les seuls à proposer l'utilisation de systèmes CPS dans une PME pour le pilotage industriel. Ils montrent l'intérêt de la

connectivité à une machine de production et définissent un nouveau format de données pour les pièces produites permettant à la machine de contrôler et d'optimiser les opérations à réaliser.

Comme les CPS sont très complexes, ils intègrent des algorithmes de traitement de données par exemple, il n'est pas surprenant de noter que le manque de compétences internes des PME constitue un obstacle majeur dans la réalisation de ce moyen de mise-en-œuvre (Evangelista et al., 2013).

- **le *Cloud Compting***

Le *Cloud Computing* est le moyen de mise en œuvre le plus utilisé dans les cas empiriques que nous avons identifiés. Plus de 65 % des articles signalent l'utilisation de *Cloud Computing*. Nous avons classifié les articles suivant cinq types d'utilisation comme le montre le Tableau 5 : le partage de document, l'offre de service, la collaboration, la production distribuée et l'optimisation des ressources.

Plusieurs travaux utilisent le *Cloud Computing* dans le but de construire des entreprises virtuelles, des réseaux de collaboration avancée entre PME (Fornasiero and Zangiacomì, 2013; Holtewert et al., 2013; Huang et al., 2013; Peng et al., 2012; Ren et al., 2015; Shamsuzzoha et al., 2016; Song et al., 2014; Wang and Xu, 2013). Sur la base des observations que les PME ne possèdent pas, toutes les compétences et les capacités pour satisfaire les besoins complexes des clients, les modèles proposés favorisent le développement de la collaboration industrielle entre plusieurs partenaires qui, en mettant leur compétence et leur différent métier en commun, peuvent répondre positivement aux besoins des clients. Ainsi, les plateformes de *Cloud Computing* poussent à passer d'une offre de « ce que j'ai » vers une offre de « ce que je peux réaliser » et comment il peut être partagé dans un réseau de partenaires.

La création de tel réseau dépend non seulement de la disponibilité d'une plateforme de *Cloud Computing* adaptée, Hao et al. (2016) décrivent les premières étapes pour la création d'entreprise virtuelle : trouver des partenaires et ensuite contractualiser les engagements et les risques. Une fois ces étapes réalisées, il est possible de passer à une collaboration et à l'optimisation opérationnelle des ressources des différents partenaires.

Shamsuzzoha et al. (2016) présentent un concept de plateforme *Cloud Computing* basé sur le *Net-Challenge Framework*, répondant aux stratégies spécifiques du *Make-To-Order* et d'*Engineering-To-Order*. La collaboration entre les partenaires

est obtenue pour répondre aux besoins spécifiques de chaque client. Une fois le besoin satisfait, l'organisation virtuelle est dissoute.

Cependant Herdon et al. (2012) constatent que les PME disposent de système d'informations internes qui n'autorisent pas la connexion directe avec des systèmes en *Cloud Computing*. Ils proposent donc de transférer gratuitement les données des PME vers le *Cloud Computing* afin de faciliter la diffusion de cette solution. Cependant, malgré cette offre, les PME n'adhèrent pas à la solution de *Cloud Computing*.

Bonfanti et al. (2015) montrent que le *Cloud Computing* permet aux entreprises artisanales italiennes d'offrir des produits et des services en ligne. La création d'un nouveau produit ou service par les interfaces internet et les plateformes de *Cloud Computing* renforce la fidélité des clients tout en permettant l'accès à de nouveaux marchés.

En conclusion, nous notons que les plateformes de *Cloud Computing* favorisent la planification et l'utilisation des ressources partagées, le contrôle des processus et l'évaluation des performances.

- **la réalité virtuelle**

Hao et Helo (2015) montrent l'avantage d'utiliser l'internet des objets, le Cloud Computing et la réalité virtuelle. L'utilisation de lunettes intelligentes permet d'afficher dans le champ de vision de l'utilisateur les informations en temps réel. Les événements perturbateurs semblent les plus visibles, ce qui amène les employés à être réactifs. De même, la maintenance des outils et machines de production est facilitée par la disponibilité des données requises et permet de restaurer rapidement les équipements défectueux.

- **la cyber sécurité**

MacKerron et al. (2014) et Holtewert et al. (2013) étudient la cyber sécurité dans l'environnement de production où l'internet des objets et le *Cloud Computing* sont utilisés. Cependant, la cyber sécurité n'est pas le sujet central de leur article.

- **les robots collaboratifs et la communication entre machines**

Les robots collaboratifs et la communication entre machines permettent de décentraliser la prise de décision au cœur des processus de production. Nous n'avons identifié aucun cas d'application de ces moyens de mise-en-œuvre dans les articles étudiés.

3.3.3 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART

Dans cette section, nous discutons et nous synthétisons les résultats de notre recherche bibliographique. Nous présentons également les limites et les perspectives de notre recherche.

La flexibilité est l'objectif de performance le plus observé dans les travaux de recherche sélectionnés comme l'illustre la Figure 16. Cela pourrait être surprenant pour les praticiens, car la flexibilité est une des caractéristiques qui fait la force des PME par rapport aux grandes entreprises. L'industrie 4.0 favorise la prise de décision décentralisée et ainsi la capacité à réagir rapidement et localement à une difficulté ; la flexibilité devrait être mise en avant dans la littérature pour les grandes entreprises dont les structures sont souvent peu flexibles.

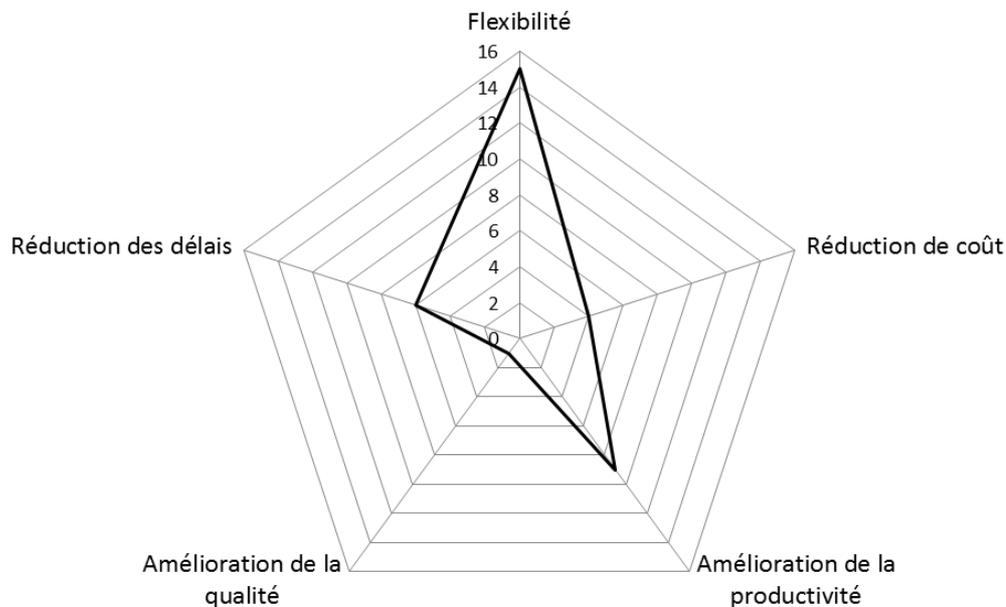


Figure 16 : nombre d'articles traitants de chaque objectif opérationnel

Quelques travaux de recherche proposent des solutions pour réduire les délais (6 articles) ou pour réduire les coûts (4 articles). Nous pensons que ces deux objectifs de performance pourraient être des vecteurs de progression pour les PME, cela améliorera leurs points faibles.

Étonnamment, l'industrie 4.0 n'apparaît pas comme un vecteur de progression de la qualité dans les PME. Cela devrait changer lorsque les techniques d'identification d'erreur seront développés et rendus plus accessibles (Cayiroglu and Demir, 2012).

Cette revue de la littérature a également mis en évidence un changement majeur dans la manière d'intégrer le pilotage industriel des PME. De nombreux chercheurs ont déjà montré que l'industrie 4.0 pouvait être implantée en utilisant une approche itérative et l'amélioration continue et le *Lean Manufacturing* (Kolberg and Zühlke, 2015). Comme l'industrie 4.0 vise à l'accélération des flux d'informations et que le Lean Manufacturing se concentre sur l'élimination des déchets pour accélérer les flux physiques, la synergie entre les deux méthodes devrait être considérée comme une cible de l'excellence opérationnelle. À l'avenir, il est nécessaire de prolonger les recherches sur cette synergie.

Concernant les capacités managériales, l'analyse de la littérature a clairement montré que les applications de l'industrie 4.0 actuelles se concentrent sur la surveillance et le contrôle des processus industriels dans les PME comme le montre la Figure 17.

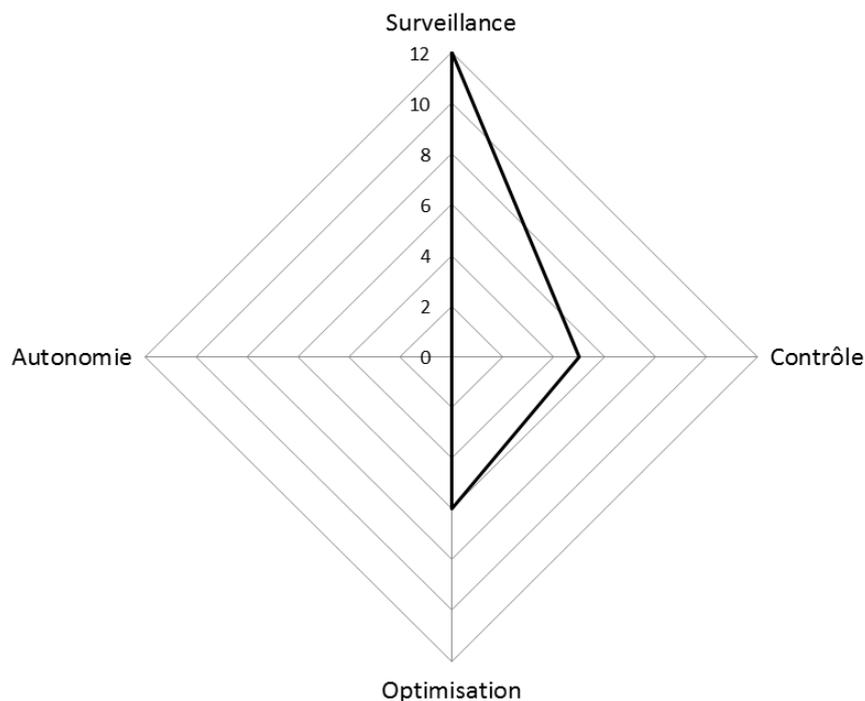


Figure 17 : nombre d'articles relatifs à chaque capacité managériale

Bien que la simulation soit un vecteur d'optimisation des processus de production, il y a peu de cas où les données sont exploitées à des fins de pilotage des flux en identifiant les goulots, déclenchant ainsi une prise de décision en temps réel basé sur les données historiques et l'état du système. Nous notons également que les initiatives d'exploitation de la simulation sont portées par les équipes académiques de recherche et non par le personnel de la PME. En effet, lors de précédente recherche, il a été montré que les PME manquent d'expertise support de l'optimisation des processus de production (Achanga et al., 2006; Moeuf et al., 2016), les modèles et outils de simulation devraient être plus accessibles aux PME.

Parmi les articles sélectionnés, la capacité de surveillance est la plus exploitée sous forme d'un transfert de données depuis l'atelier de production vers un système centralisé générant des alertes en cas de déviation. D'une manière similaire, les modèles de simulation sont maintenant exploités en utilisant les informations en provenance de l'atelier. Les deux cas sont des exemples d'intégration verticale des systèmes d'information similaires à l'intégration des ERP-MES (Saenz de Ugarte et al., 2009) traditionnelle adoptée par de nombreuses grandes organisations. Cependant, cette revue de littérature n'a pas révélé de cas d'intégration horizontale du système, en exploitant par exemple la communication entre machines) comme nous pouvons le faire à l'aide de l'industrie 4.0. Une telle intégration est nécessaire pour accélérer les processus de prise de décision (automatiser éventuellement les processus décisionnels) et la reconfiguration des systèmes de production.

En termes d'exploitation des moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0, la situation est également contrastée en fonction des groupes technologiques et des méthodes exploitées par l'industrie 4.0. Le *Cloud Computing* est clairement l'outil exploité par les PME comme l'illustre la Figure 18.

Le développement d'une organisation virtuelle, soutenue par le *Cloud Computing* et d'autres technologies, est également présenté par de nombreux travaux de recherche. Les plateformes de Cloud Computing semblent améliorer et faciliter la collaboration entre les entreprises partageant l'information et les connaissances, créant ainsi de meilleurs partenariats et ouvrant de nouvelles opportunités.

Cependant, aucun auteur ne traite des problèmes de confidentialité attachée aux informations relatives aux clients et aux informations sur le système de production. Alors que peu d'articles traitent de la cyber sécurité dans les PME au sens général du terme, ils fournissent rarement des moyens de protection des systèmes informatiques et des données confidentielles lorsqu'ils adoptent l'industrie 4.0. Cette observation pourrait suggérer qu'il y a un manque de sensibilisation, ou

tout simplement, que les dirigeants de PME considèrent que la cybersécurité est gérée par les plateformes de *Cloud Computing* et d'autres plateformes de communication moderne. Les failles de sécurité informatique, bien que dépendante d'accès réseau, sont principalement dues aux comportements des employés (Aoyama et al., 2015) ; donner l'accès à de nouvelles technologies de communication à des employés sans sensibilisation sur la cyber sécurité est un risque fort pour l'entreprise.

Malheureusement, notre revue de la littérature scientifique n'a pas identifié d'utilisation de l'analyse des données massives dans les PME, même si elles ont été largement reconnues comme des méthodes très appréciées pour optimiser l'utilisation des ressources dans d'autres entreprises (Lee et al., 2014).

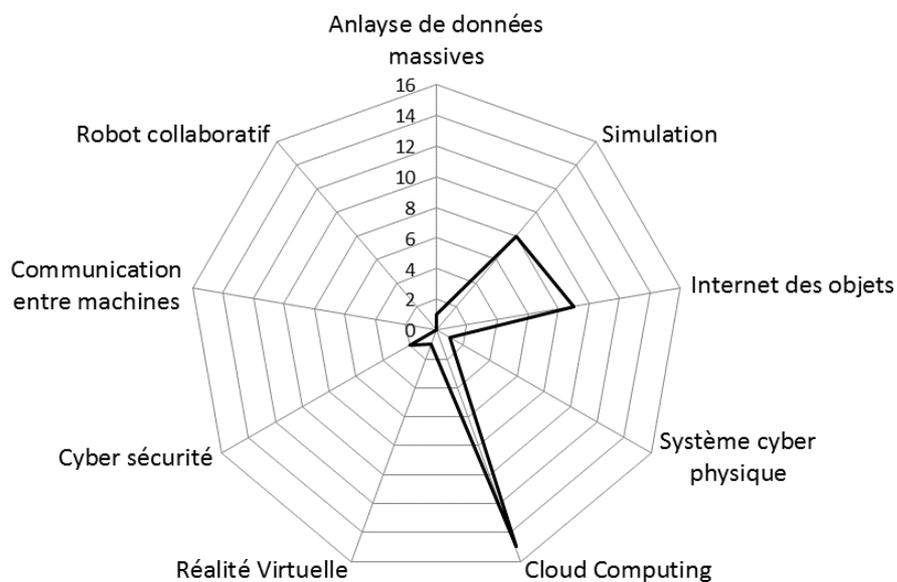


Figure 18 : nombre d'articles traitant de chaque moyen de mise-en-œuvre

Certains auteurs soutiennent que les PME ne considèrent pas la valeur potentielle se trouvant au sein de leurs données (Bi and Cochran, 2014). Cependant, l'accessibilité et l'exploitation de l'internet des objets, ou d'une autre source de données comme la technologie RFID, augmenteront les sources de données et la génération de données. Les PME devraient exploiter à l'avenir les données dans le but d'optimiser les flux de production à bas coût. Il apparaît clairement que des travaux de recherche sont nécessaires pour rendre accessibles les outils d'analyse de

données massives aux PME en formulant des méthodes claires et pratiques qui décrivent les étapes de mise-en-œuvre, les techniques requises, les outils, les rôles et les compétences nécessaires.

Nous avons également noté que les CPS ne sont pas présents dans les PME, bien que deux voies d'intégration puissent être envisagées : l'achat de nouveaux équipements et/ou la mise à niveau d'équipement existant dans les entreprises. Comme l'ont proposé Becker et Wagner (2016), les PME devraient cibler les machines les plus critiques de leur processus de fabrication et ainsi limiter les coûts d'investissement. D'une manière similaire, les robots collaboratifs et la communication entre machines ne sont pas exploités par les PME. Ces trois moyens de mise-en-œuvre sont très coûteux avec un retour sur investissement à long terme. En outre, ces technologies visent principalement à améliorer la flexibilité, ce qui n'est pas nécessairement le besoin des PME dont la flexibilité est déjà une force. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour démontrer les avantages que peuvent tirer les PME de ce groupe de technologie.

La mise-en-œuvre des initiatives d'industrie 4.0 et l'évaluation de leur impact sur les processus internes doivent faire l'objet d'une enquête plus approfondie. Comme pour d'autres stratégies, il semble que les chercheurs se soient focalisés sur le développement et la validation des groupes technologiques. Cependant, étant donné que cette approche s'appuie sur des technologies, des méthodes et de nombreux outils, il est évident que les chercheurs doivent proposer et valider les méthodes de mise-en-œuvre. Comme cela fut le cas pour les systèmes antérieurs de pilotage industriel, tels que les systèmes MRP, ERP et MES, nous pouvons nous attendre à ce que les méthodologies développées pour les grandes entreprises ne correspondent pas aux besoins et aux contraintes des PME.

En outre, nous reconnaissons que les projets industrie 4.0 peuvent être l'occasion de modifier les processus (pas seulement les améliorer) et de s'ouvrir ainsi à de nouvelles opportunités de marchés. Afin d'adopter pleinement tous les avantages potentiels de l'industrie 4.0, les dirigeants de PME doivent cesser de voir le système de production en tant que « coût », mais comme un vecteur pour transformer en profondeur leur modèle d'affaires. Malheureusement, cette revue de la littérature révèle que cette vue « coût » de l'investissement sur le système de production a largement influencé l'adoption des groupes technologiques à faible coût, tel que le *Cloud Computing*, pour améliorer les processus de production plus rapidement et moins cher sans vraiment transformer les liens entre clients et four-

nisseurs. En effet, les systèmes CPS et la communication entre machines, qui offrent de nouvelles opportunités pour une production unitaire et personnalisée ainsi qu'un service au client, n'ont pas été adoptés dans les PME.

En dépit du manque d'expertise des PME, l'industrie 4.0 devrait faire partie intégrante de leur stratégie, car elle fournit des moyens de connexion avec les partenaires, la réalisation de processus autonomes, la synchronisation des flux et la personnalisation des produits. Les grandes entreprises visent à tendre vers une proximité client forte et des produits personnalisés, historiquement ce sont les PME qui avaient ces atouts, l'industrie 4.0 pourrait permettre aux grandes entreprises de s'approprier les vertus des PME, il est nécessaire pour les PME d'envisager également d'autres opportunités.

Notre recherche n'a permis d'identifier que 23 cas d'application de l'industrie 4.0 dans les PME en vue d'améliorer le pilotage industriel. Dans la plupart des cas, les processus de mise-en-œuvre ne sont pas clairement décrits. Afin d'identifier plus de cas réels et leur succès, il serait pertinent de compléter ce type d'approche par des enquêtes de terrain. Il existe également un biais subjectif dans la lecture et la sélection des articles lors de la revue de littérature. Dans notre cas, nous avons ignoré les types de revues commerciales et nous nous sommes concentrés uniquement sur les revues scientifiques. Les retards dans l'acceptation et la publication des articles peuvent certainement avoir un impact sur le nombre de documents sélectionnés et sous-estimer le niveau réel de l'adoption de l'industrie 4.0 dans les PME. Enfin, les études de cas décrivent parfois des résultats qualitatifs et non quantitatifs. Il est donc complexe de juger des avantages réels obtenus par les PME avec l'exploitation de l'industrie 4.0.

3.4 PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESE DE RECHERCHE

L'état de l'art a montré la nécessité d'identifier les risques et les points d'intérêt de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME. En effet, l'industrie 4.0 est vue comme un ensemble de groupes technologiques pouvant être exploités indépendamment les uns des autres. Cependant, c'est l'ensemble des technologies qui permet de proposer une approche innovante du pilotage industriel et de nouvelles propositions de valeurs pour les entreprises.

L'industrie 4.0 représente également des coûts de différentes natures pour les entreprises. Lorsque l'on parle de coûts, il y a également la notion de risque : nouvelle organisation, risque technologique, stress, modification des fonctions et des

missions, changement des environnements de travail par exemple. Ces risques sont-ils pertinents au regard des intérêts de l'industrie 4.0 pour les PME ?

3.4.1 PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE

Notre constat est qu'il existe trop peu de cas d'application pour tirer des conclusions à partir des cas empiriques d'application de l'industrie 4.0 dans les PME. En conséquence, nous n'avons pas d'idée précise sur les formes d'exploitation intéressantes de l'industrie 4.0 pour les PME ni sur les risques encourus par les industriels en se lançant dans l'exploitation de ce concept.

Une telle identification est nécessaire pour assurer une réussite aux industriels et à l'évolution à venir des modes de pilotage industriel. Ainsi, notre problématique de recherche est :

Identifier les risques, les facteurs critiques de succès et les opportunités associés à l'industrie 4.0 pour une application au pilotage industriel des PME.

D'une part, nous avons montré que les PME présentaient des caractéristiques managériales et organisationnelles particulières. D'autre part, nous avons également identifié les groupes technologiques composant de l'industrie 4.0. Notre périmètre d'étude se limite donc à deux secteurs d'études :

- les risques managériaux ; et
- les risques technologiques.

3.4.2 HYPOTHESES DE RECHERCHE

3.4.2.1 HYPOTHESE 1 : IL EST POSSIBLE D'IDENTIFIER LES RISQUES DE L'INDUSTRIE 4.0 DANS LES PME

Nous l'avons vu lors de notre analyse de la littérature scientifique concernant l'industrie 4.0 dans les PME, peu de cas empiriques sont référencés et décrits. Il semble difficile de se baser sur les cas décrits pour identifier les risques encourus par les industriels.

Nous cherchons cependant à anticiper ces risques, pour cela nous postulons qu'il est possible d'exploiter une méthode prospective type méthode DELPHI pour

identifier les risques. Cette méthode vise à l'identification d'un consensus à l'aide d'expert des domaines de recherche concernés.

CHAPITRE 4

Étude prospective Delphi-Régnier : identification des risques, oppor- tunités et facteurs critiques de succès pour l'exploitation de l'in- dustrie 4.0 dans les PME

4.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre 3, nous avons effectué un état de l'art afin d'identifier les cas d'application de l'industrie 4.0 dans les PME. L'état de l'art a montré qu'il y avait peu de cas documentés dans la littérature scientifique, mais ces quelques cas ont également montrés des disparités importantes dans l'exploitation des différents moyens de mise-en-œuvre de l'industriel 4.0 au sein des PME.

Il apparaît que les cas d'application décrivent des exploitations isolées des différents groupes technologiques. Les entreprises ne semblent pas considérer comme un ensemble unifié les groupes technologiques, mais comme des outils isolés répondant à une problématique donnée.

Autre élément, les PME n'exploitent pas les outils de l'industrie 4.0 pour modifier leur modèle d'affaires, elles se contentent de modifier leurs processus et leurs offres actuels.

Il nous est apparu l'intérêt d'identifier les risques, les opportunités et les facteurs critiques de succès (*CSF : Critical Success Factors*) de l'exploitation de l'industrie 4.0 afin d'aider les décideurs et les cadres des entreprises.

Ce chapitre présente la recherche que nous avons menée auprès d'experts à travers la méthode Delphi et l'exploitation des abaques de Régnier. Dans un premier temps, nous justifions et décrivons les méthodes prospectives avant d'expliquer plus en détail la méthode Delphi-Régnier.

Par la suite, nous synthétisons les résultats de l'étude en présentant selon les différents items les opinions des différents experts.

4.2 METHODES PROSPECTIVES

Nous avons montré dans l'état de l'art que le nombre de cas d'application de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME était faible, nous n'avons trouvé que 23 articles répondant à nos critères.

Afin d'identifier les CSF, une enquête de terrain serait complexe à mettre en œuvre, car il faudrait trouver de nombreux cas d'application. Actuellement, le nombre de PME ayant mis en œuvre l'industrie 4.0 reste faible et complexe à identifier.

Il ne semble pas y avoir de justification scientifique évidente pour identifier les risques, opportunités et facteurs critiques de succès concernant l'exploitation de l'industrie 4.0 pour le pilotage industriel des PME. Dans le cadre de recherche scientifique, il est parfois possible d'effectuer une démonstration permettant de valider un résultat sans procéder à une expérience, mais ce n'est pas le cas pour l'exploitation du concept industrie 4.0 dans les PME. Ainsi, Helmer et Dalkey (1963) estiment qu'en l'absence de justification scientifique valable, le jugement d'experts peut s'avérer pertinent.

Afin de répondre à notre objectif, notre recherche s'appuie sur une méthode faisant appel à l'avis d'experts, la méthode Delphi via les abaques de Régnier. Nous décrivons dans la section suivante la méthode de Delphi, puis les abaques de Régnier.

4.2.1 METHODES DELPHI

La méthode Delphi fait référence à l'oracle de Delphes, la Pythie étant remplacée par les experts. Cette méthode est née dans les années 1950 à la « *Rand Corporation* », développée par O. Helmer et N. Dalkey (Gordon and Helmer, 1964). L'objectif de cette étude était de prévoir méthodiquement « l'orientation des

tendances technologiques et scientifiques à long terme, et leurs effets probables sur les sociétés ».

La méthode Delphi se fonde sur deux principes fondamentaux :

- l'anonymat des résultats ; et
- l'indépendance des jugements.

La méthode Delphi visait à supprimer l'effet néfaste de l'influence entre experts qui se créaient lors de réunions en face à face. La méthode Delphi a pour finalité de mettre en évidence des convergences d'opinions d'experts et de dégager un accord sur des sujets précis (Maleki, 2009).

La méthode Delphi consiste à interroger un panel d'expert d'horizons divers. Cette consultation se distingue de la simple interview, en ce sens qu'elle implique le respect d'une série de démarches, dont les principales sont les suivantes :

- l'élaboration d'un questionnaire soumis aux experts ;
- le dépouillement et le traitement des réponses ;
- à partir de ces réponses, l'élaboration d'un nouveau questionnaire soumis aux mêmes experts à qui on révèle les réponses au premier questionnaire, et à qui il est demandé d'introduire des nuances ou de donner les raisons de leur choix ; et
- le respect des principes précédents jusqu'à l'obtention de tendances communes et précises (consensus et dissensus).

Dans le cadre d'une méthode Delphi classique, le traitement statistique des réponses impose que les questions abordées puissent être positionnées selon leurs notations comprises ou non dans un intervalle moyen établi sur la base de toutes les réponses (par exemple en évaluant la médiane et un intervalle interquartile).

Une enquête Delphi est donc conditionnée par l'utilisation, pour chaque donnée, d'une échelle quantitative (nombre, quantité, date, distance par exemple). Dans notre cadre d'étude, l'information recherchée est essentiellement qualitative. C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser une méthode de traitement de l'information associant la méthode Delphi avec un processus de gestion des données qualitatives, à savoir l'Abaque coloré développé par le docteur François Régnier (Maleki, 2009). Nous décrivons cette méthode de traitement au sein de la section suivante.

4.2.2 ABAQUES DE RÉGNIER

L'abaque est une technique originale qui exploite une échelle de couleur pour recueillir les opinions des experts concernant des affirmations choisies dans des termes précis, concis, concrets et pertinents.

Pour exprimer leur opinion face à une affirmation, les experts ont le choix parmi 7 couleurs comme l'illustre le Figure 19 :

- vert : l'expert est tout à fait d'accord avec l'affirmation ;
- vert pâle : l'expert est en accord avec l'affirmation ;
- orange : l'avis de l'expert est mitigé ;
- rouge pâle : l'expert est en désaccord avec l'affirmation ;
- rouge : l'expert n'est pas du tout d'accord avec l'affirmation ;
- blanc : ne peut pas répondre ; et
- noir : ne veux pas répondre.

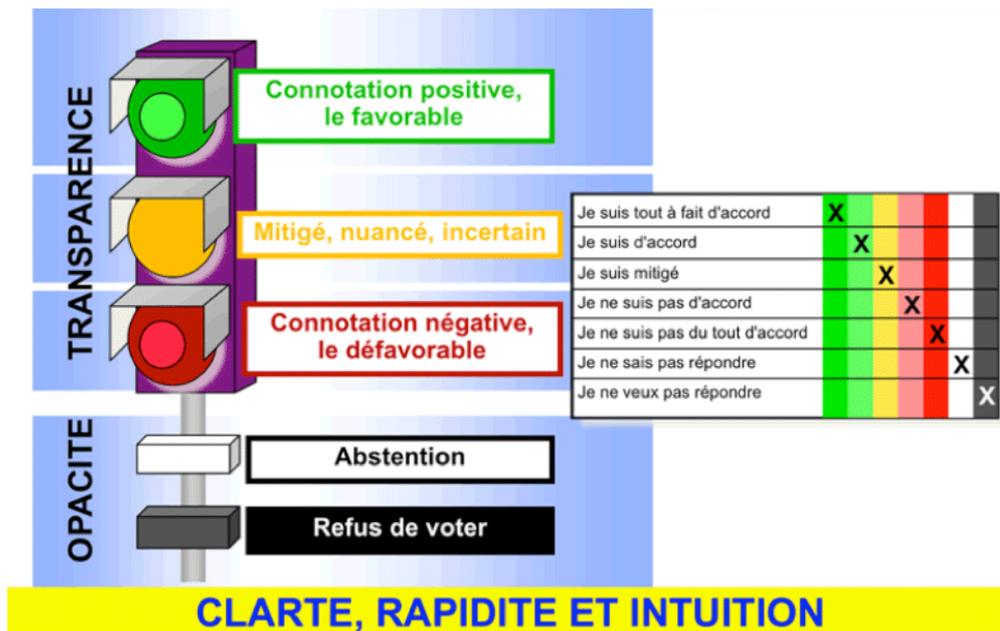


Figure 19 : présentation des réponses possibles pour une affirmation donnée⁵

⁵ Source : <http://www.ressources-prospective.com/gerpa2/recherche-prospective/exploration-prospective-methode-et-outils/>

Ce système repose sur l'analogie avec les feux de signalisation codifiée pour la circulation routière. Les feux tricolores indiquent une transparence dans les réponses, alors que le blanc et le noir indique une opacité.

L'information collectée apparaît sous la forme d'un diagramme coloré qui apporte une dimension complémentaire au langage écrit ou parlé. Cette lecture permet d'obtenir une information claire et intuitive rapidement. L'information ainsi stockée constitue un ensemble de microdécisions individuelles. Ainsi, l'avantage de cette technique est la rapidité de résumer les opinions et la visualisation colorée des résultats qui facilite la prise de décision.

Cette technique est exploitée principalement lors de réunion entre experts, favorisant l'initiation d'un débat orale. Par exemple, en interrogeant sur les causes d'un choix tel que « vert claire », « et pourquoi pas vert foncé ? ». Cependant, nous adaptons dans notre recherche cette technique à l'étude Delphi dont l'anonymat est l'un des principes fondamentaux. Ainsi, nous n'utiliserons l'échelle de couleurs uniquement pour ses atouts visuels, mais pas dans le but d'initier une discussion avec (et entre) les experts.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons exploité l'outil open source Color Insight (<http://www.colorinsight.fr/>) permettant de créer les questionnaires, de collecter les réponses et d'organiser les représentations colorées pour faire ressortir immédiatement les consensus et dissensus et les affirmations présentant des avis mitigés.

4.3 ORGANISATION DE L'ÉTUDE

Nous décrivons ici l'organisation de l'étude que nous avons menée, nous faisons références à l'équipe organisatrice de l'étude par le terme « équipe de pilotage ». Nous aborderons la sélection des experts, la création du premier questionnaire et la synthèse des résultats.

4.3.1 SELECTION DES EXPERTS

L'un des points importants de la méthode Delphi est la constitution du panel d'expert. L'équipe de pilotage a donc en charge de définir le nombre, les compétences, la composition et le fonctionnement du panel d'experts.

La liste d'experts comprend toutes personnes dont les savoirs et/ou expériences leur donnent les capacités à pouvoir développer le champ d'études. Le recrutement d'experts sur une base homogène risque d'obtenir des résultats biaisés par un courant de pensée. Il est donc conseillé de sélectionner un panel d'expert hétérogène favorisant les avis différents (Maleki, 2009).

Les experts doivent avoir des connaissances dans les domaines de l'étude. L'équipe de pilotage étant elle-même experte du domaine, elle a sélectionné des experts suite à l'analyse de leur parcours académique et professionnel.

Le nombre d'experts est également un point important. Pourtant, selon les travaux de Van de Ven et Delbecq (1974), le nombre d'experts doit être déterminé en fonction des objectifs. Ils précisent dans leurs travaux qu'un groupe de sept experts favorisent la génération d'idées. A contrario, un faible nombre d'experts ne permet pas de généraliser les résultats d'une étude, malheureusement, ils ne précisent pas ce nombre.

Les travaux de Ashton (1986) montrent que la taille du groupe d'experts d'un sujet donné pour une étude par consultation se situe autour de 11 experts. Maleki précise qu'il faut au moins 30 experts pour valider une étude Delphi, et lors des travaux de Héraud sur les technologies du futur, l'équipe de pilotage de l'étude avait sélectionné 3388 experts (Héraud et al., 1997).

Autrement dit, le nombre d'experts ne s'impose pas a priori, nous avons choisi de sélectionner 12 experts du monde de l'industrie 4.0, un choix favorisant l'émergence d'idée via les propositions d'affirmation demandées aux experts tout en considérant les travaux d'Ashton (1986) comme référence. Afin de ne pas avoir un panel d'expert trop homogène, nous avons sélectionné des experts issus de domaines différents :

- quatre experts académiques ;
- quatre experts de l'industrie 4.0 issus de l'industrie ; et
- quatre dirigeants de PME.

Ce panel d'expert a répondu aux différents questionnaires soumis. Toutes les réponses étaient exploitables, aucun des experts n'a abandonné au cours de l'étude.

4.3.2 CREATION DU QUESTIONNAIRE INITIAL

L'initialisation du questionnaire pour soumettre aux experts est un élément clef, car il oriente de manière significative les domaines sur lesquels l'étude Delphi-Régnier apportera des réponses. L'objectif de l'étude est d'évaluer les facteurs de risques, les opportunités et les facteurs critiques de succès ; nous avons initié le questionnaire en analysant ces éléments au sein d'article traitant de concepts connexes tels que :

- les « *advanced manufacturing technology* » (Dangayach and Deshmukh, 2005; Raymond, 2005) ;
- les ERP (Doom et al., 2010; M. Beheshti et al., 2014; Shaul and Tauber, 2012; Somers and Nelson, 2001) ;
- le *lean manufacturing* (Achanga et al., 2006) ;
- le six sigma (Kumar et al., 2009) ; et
- le *Total Quality Management* (Ismail Salaheldin, 2009; Saraph et al., 1989; Yusof and Aspinwall, 2000).

À l'aide de cette étude, nous avons listé les risques et les facteurs critiques de succès relatifs à l'implantation de ces concepts au sein des entreprises.

L'équipe de pilotage réalisa une sélection des éléments pouvant impacter l'industrie 4.0. Par exemple, la notion « *IT and innovation* » revenait dans seulement deux articles, mais prenait une importance capitale pour traiter de l'industrie 4.0.

Nous présentons la liste des facteurs critiques de succès identifiés dans le Tableau 6 et nous indiquons le taux de présence dans les 11 articles exploités pour cette préétude. Nous pouvons distinguer que les « moyens financiers » n'apparaissent pas comme un facteur déterminant. Par contre, le « support des dirigeants » et « l'importance de la formation » sont présents dans de nombreux articles. Nous avons initialisé le premier questionnaire à l'aide des différents facteurs critiques de succès ainsi identifiés.

Suite à cette préétude, nous avons complété le questionnaire avec des éléments propres à l'industrie 4.0, tel que les questions concernant le *big data* ou le *cloud computing*. Nous avons synthétisé nos affirmations à soumettre en deux catégories représentatives : **l'organisation** d'une part et **les technologies** d'autre part.

Facteurs critiques de succès	Nombre d'oc- currences
<i>Project management</i>	9 / 11
<i>Implication de la direction</i>	9 / 11
<i>Formation des utilisateurs</i>	8 / 11
<i>La culture de l'organisation</i>	7 / 11
<i>Des objectifs clairs</i>	6 / 11
<i>Les compétences de l'équipe projet</i>	6 / 11
<i>La conduite du changement</i>	5 / 11
<i>Le système de mesure de la performance</i>	4 / 11
<i>La communication entre services</i>	4 / 11
<i>L'accompagnement par des consultants</i>	4 / 11
<i>L'amélioration continue</i>	3 / 11
<i>La connaissance des processus d'affaires</i>	3 / 11
<i>L'IT et l'innovation</i>	2 / 11
<i>L'infrastructure numérique</i>	2 / 11
<i>Les moyens financiers</i>	2 / 11
<i>Le changement de l'organisation</i>	2 / 11

Tableau 6 : Liste des CSF identifiés lors de la préétude Delphi-Régnier

4.3.3 ÉVOLUTION DU QUESTIONNAIRE

Le questionnaire initial doit être envoyé aux experts. Ce questionnaire est composé de 24 affirmations sur lesquelles les experts doivent donner leur avis en sélectionnant une des couleurs proposées. Les différents questionnaires sont présentés en annexe.

Suite à leurs réponses, les experts sont également invités à proposer une affirmation à soumettre aux autres experts lors du questionnaire suivant (Figure 20). L'équipe de pilotage a en charge de synthétiser les propositions (principalement en cas de doublon) et éventuellement reformuler les questions afin d'en garantir la compréhension par le panel d'experts.

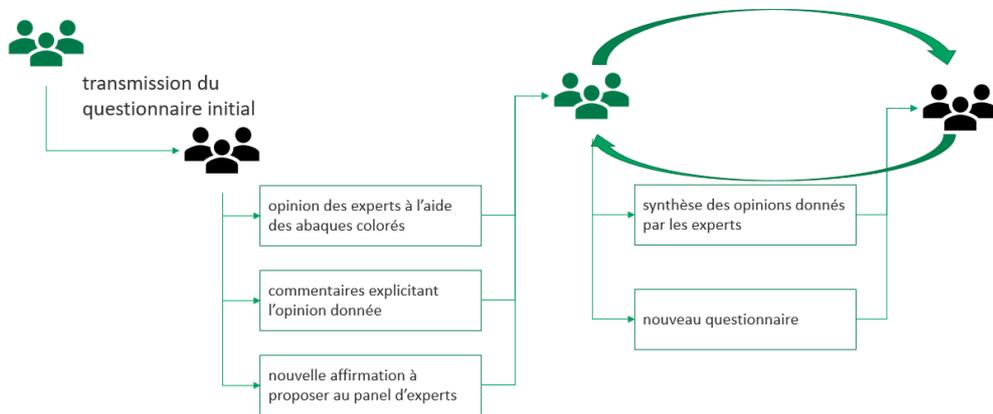


Figure 20 : création et évolution des questionnaires de l'étude Delphi-Régnier

Ce mode de fonctionnement permet de faire émerger des affirmations auxquelles l'équipe de pilotage n'aurait pas pensé et ainsi enrichit fortement l'étude Delphi-Régnier.

Lors des échanges, les experts ont soumis un total de 36 affirmations complémentaires lors des deux premiers tours qui ont été soumis au panel d'experts.

4.4 SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DELPHI-REGNIER

Suite à l'étude Delphi-Régnier, l'équipe de pilotage a synthétisé les réponses aux questions des experts. Lors du premier tour de l'étude, les questions étaient préparées par l'équipe de pilotage, mais pour les tours suivants ce sont les experts qui ont apporté une liste d'affirmations à porter au jugement des autres experts de l'étude.

Cette approche a permis de faire évoluer le questionnaire et l'étude dans des thématiques complémentaires à celles initiées par l'équipe de pilotage. Nous avons ainsi regroupé le positionnement des experts sur les affirmations sous quatre thématiques :

- l'organisation de la PME ;
- les technologies de l'industrie 4.0 ;
- l'implantation de l'industrie 4.0 ;
- les opportunités offertes par l'industrie 4.0.

Nous présentons dans les sous-sections suivantes la synthèse des réponses aux différents questionnaires suivant les quatre thématiques identifiées. Nous indiquons sous le formalisme suivant les références aux items présentés aux experts :

RY – IX : faisant référence au questionnaire Y et à l'item X

Par exemple, la référence R1 – I4 fait référence au questionnaire 1 item 3, soit « *La vision à courte-vue des PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0* ». Les synthèses complètes des trois tours comportant la liste des affirmations sont disponibles en annexe 1, 2 et 3.

4.4.1 L'ORGANISATION

Le premier thème analysé lors de notre étude était l'organisation de la PME. Nous avons vu lors de l'analyse de la structure des PME que l'organisation et les modes de coordination étaient spécifiques à ces entreprises. Nous avons proposé aux experts des affirmations visant à évaluer l'impact de ces spécificités sur la capacité des PME à exploiter l'industrie 4.0.

Plusieurs sous-thématiques sont ressorties concernant ce thème :

- la stratégie courte-vue des PME ;
- la prépondérance du dirigeant et son impact ;
- le manque de fonction support experte ; et
- la courte ligne hiérarchique.

Nous aborderons le détail de chacune de ces sous-thématiques ci-après.

4.4.1.1 LA STRATEGIE COURTE-VUE DES PME

Dans une PME, l'une des caractéristiques est la stratégie courte-vue de l'entreprise, principalement centrée sur le dirigeant et son instinct. Les experts constatent que les projets d'industrie 4.0 doivent s'intégrer à une vision stratégique de l'entreprise (R2 – I2) répondant aux besoins réels des PME. De même, les experts notent que la stratégie à courte vue constatée dans la majorité des PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0 (R1 – I3). Les experts notent que les changements fréquents de priorités au sein des PME sont un frein au lancement de projet industrie 4.0.

4.4.1.2 LA PREPONDERANCE DU DIRIGEANT ET SON IMPACT

Les PME connaissent une organisation très verticalisée avec une concentration du pouvoir entre les mains du dirigeant. La ligne hiérarchique est courte et le dirigeant s'implique de manière importante dans le quotidien de l'entreprise.

Les experts notent que l'attitude du dirigeant vis-à-vis de l'industrie 4.0 joue un rôle clef dans l'adoption par une PME de ce concept. Les experts précisent qu'un cadre ayant une forte présence opérationnelle peut équilibrer les ressources pour permettre la réalisation d'un projet Industrie 4.0 (R1 – I1). Dans le cas d'un dirigeant « *early - adopter* » et technophile, il cherchera à implanter rapidement l'industrie 4.0 et/ou toute autre technologie dont il pense pouvoir tirer un impact positif sur la performance de son entreprise (R1 – S2). Inversement, un dirigeant conservateur sera plus compliqué à convaincre. Toutefois, les experts restent mitigés concernant l'importance de ce dernier principe, une moitié juge que le dirigeant doit avoir une « appétence » pour les nouvelles technologies lorsque l'autre moitié des experts note qu'il faut que le dirigeant ne soit pas réfractaire aux nouvelles technologies pour se laisser potentiellement convaincre.

Enfin, les experts proposent que, tout comme pour les projets Lean Manufacturing, le dirigeant se rapproche de réseau d'échange entre entreprises pour estimer les possibilités offertes par l'entreprise (R1 – I12).

En conclusion, les experts ne trouvent pas de consensus concernant l'impact de la structure verticalisée avec un pouvoir centralisé sur le dirigeant sur les projets d'implantation de l'industrie 4.0. Cependant, il faut noter que l'industrie 4.0 semble devoir s'inscrire dans une stratégie d'entreprise à long terme et que la stratégie courte vue d'une PME résulte du dirigeant et de son implication dans l'opérationnel de son entreprise.

4.4.1.3 LE MANQUE DE FONCTION EXPERTE SUPPORT

Dans les PME, les fonctions sont principalement tournées vers l'activité opérationnelle. Les fonctions supports et expertes sont peu représentées, voire négligées.

Les experts notent l'importance de l'expertise à plusieurs reprises au cours de l'étude. Par exemple, nous avons interrogé les experts sur la capacité des PME à exploiter les outils technologiques visant l'exploitation de la donnée, c.-à-d. le big data et la simulation. Les experts sont mitigés concernant les connaissances que possèdent les PME sur ces sujets ainsi que sur leur capacité à exploiter ces technologies. La moitié des experts sont mitigés et l'autre moitié considère que les PME n'ont pas les connaissances nécessaires (R1 – S21).

De même, les experts considèrent que la formation est importante pour assurer une montée en compétence des équipes des PME (R2 – S13). Cependant, les experts notent que les formations doivent être orientées pour répondre aux besoins des PME, dans une optique de stratégie industrie 4.0 prévue.

4.4.1.4 LA COURTE LIGNE HIERARCHIQUE

Les PME sont des entreprises où la ligne hiérarchique est courte, le dirigeant étant très au contact de ses employés. Les experts notent que cette proximité influence positivement les projets d'implantation de l'industrie 4.0 au sein des PME. La transparence et la clarté concernant les objectifs et les enjeux permettent de motiver le groupe et de limiter les phénomènes de résistances au changement (R1 – I9).

D'autre part, l'horizontalité de l'organisation d'une PME favorise la communication entre les employés. Les experts notent que les modes de coordination des PME basés sur une communication importante entre les collaborateurs favorisent l'ajustement mutuel et l'agilité nécessaire à l'implantation de l'industrie 4.0 (R1 – I11).

Les experts notent que les technologies de l'industrie 4.0 peuvent être perçues comme des moyens de surveillance des collaborateurs de l'entreprise (R2 – I5). La courte ligne hiérarchique et la transparence de l'information sont des moyens de contrer ce risque. De même, les experts affirment l'importance de l'alignement de toute la ligne hiérarchique de l'entreprise pour les projets d'implantation de l'industrie 4.0, favorisé par le peu de collaborateurs concernés dans une PME (R2 – I7).

Enfin, les experts notent également que l'absence de décomposition fonctionnelle qui caractérise les PME n'est pas un frein pour l'industrie 4.0 ; il s'agit d'un facteur favorisant l'agilité (R1 – I6).

Après cette synthèse concernant les thématiques organisationnelles, nous abordons dans la section suivante la thématique technologique.

4.4.2 LES TECHNOLOGIES

Au niveau de la thématique technologique, qui visait à présenter aux experts des affirmations en lien avec les moyens de mise en œuvre de l'industrie 4.0, nous avons identifié plusieurs sous-thématiques :

- l'importance des données au sein du concept industrie 4.0 ;
- l'importance des technologies supportant les flux d'information ; et
- le risque concernant les technologies favorisant le processus de production.

Les experts notent qu'a priori, tous les moyens de mise en œuvre de l'industrie 4.0 sont accessibles aux PME, ils précisent toutefois que les ressources (temps, moyens financiers) manquent aux PME (R2 – S23). Les experts affirment qu'il n'est pas nécessaire d'exploiter l'ensemble des 9 moyens de mise en œuvre listés à la section 3.2.2 pour exploiter l'industrie 4.0 (R1 – I18).

Toutefois, les experts présentent des avis différents en fonction des technologies et de leur application. Nous synthétisons les retours des experts au sein des sous-sections ci-après.

4.4.2.1 LA DONNEE AU COEUR DE L'INDUSTRIE 4.0

Tout d'abord, les experts notent que les PME n'exploitent pas suffisamment les données qu'elles possèdent (R1 – I16). Les outils numériques tels que les ERP sont un réceptacle de données pour les PME. De même, les experts expliquent que les dirigeants ne semblent pas considérer la donnée comme une source de valeur ajoutée. 100 % des experts confirment leur accord avec cette affirmation.

De même, les experts affirment que l'exploitation des moyens de mise en œuvre générant de la donnée, tel que l'internet des objets par exemple, est une clef pour l'amélioration de la performance industrielle des PME (R1 – I15). La récupération de données permet de mesurer plusieurs valeurs choisies tout au long du cycle de vie du produit, les entreprises peuvent ainsi améliorer la valeur ajoutée des produits.

Lors du second tour, les experts précisent que les technologies générant et exploitant de la donnée sont les plus efficaces pour améliorer la performance industrielle des PME, c.-à-d. ces technologies apportent de bons résultats pour un coût limité. En effet, ces technologies permettent de mieux cibler les sources potentielles d'amélioration (R2 – S19).

Enfin, les experts affirment qu'orienter les PME vers l'exploitation des données internes disponibles est la première étape de la transition vers l'industrie 4.0 (R2 – S20). Les experts notent également que les PME qui exploitent leurs données afin de s'améliorer ont moins de risque d'échec lors de l'implantation de l'industrie 4.0 (R1 – I16). Cependant, les experts mitigés ou défavorables à cette affirmation précisent qu'il faut d'abord posséder une technologie générant de la donnée.

4.4.2.2 LES MOYENS DE MISE EN ŒUVRE SUPPORT DES FLUX DE DONNÉES

La donnée est une clef pour l'industrie 4.0, les technologies orientées sur la génération de la donnée semblent accessibles avec de faibles moyens tout en présentant des améliorations sur la performance industrielle des PME.

Les experts notent que les moyens de mise en œuvre qui supportent les flux d'information sont des technologies facilement accessibles pour les PME telles que le *Cloud Computing* et la cybersécurité (R1 – I14).

L'infrastructure informatique de l'entreprise est également un élément clef pour l'exploitation des données (R1 – I24). Les experts notent que de nombreuses entreprises de service proposent des offres d'accès à distance proposant ainsi des services accessibles facilement.

Les experts précisent que pour une PME, il n'est pas a priori préférable de s'appuyer sur des services de Cloud Computing plutôt que de se doter d'une infrastructure informatique. En effet, les PME sous-considèrent le risque de cybersécurité (R1 – I23), ainsi il peut être préférable de ne pas choisir de service dans le Cloud dont les niveaux de sécurité peuvent parfois être de mauvaise qualité (R2 – I16).

Enfin, les experts sont favorables à l'exploitation de la simulation par les PME comme technologie d'amélioration. Bien que cette affirmation fasse consensus à plus de 92 %, les experts précisent que tout ne peut pas être simulé et que les PME manquent de ressource interne pour porter cette technologie (R1 – I17).

4.4.2.3 LES TECHNOLOGIES SUPPORTANT LES FLUX PHYSIQUES

Les moyens de mise en œuvre visant à améliorer le processus de fabrication, tel que les *Cyber Physical System* (CPS), la communication entre machines (M2M) et les robots collaboratifs ne sont pas des clefs pour l'amélioration de la performance industrielle des PME (R1 – I13).

Les experts notent que ces technologies sont les plus coûteuses et que les PME n'ont pas (où peu) les moyens financiers pour investir dans ces machines (R1 – I20).

Suite à cette synthèse concernant les moyens de mise en œuvre technologique, nous présentons ci-après les affirmations proposées relatives à l'implantation de l'industrie 4.0 au sein des PME.

4.4.3 L'IMPLANTATION DE L'INDUSTRIE 4.0

Plusieurs affirmations et commentaires des experts se sont orientés sur la phase de déploiement d'un projet industrie 4.0. Nous avons regroupé les affirmations des experts suivant plusieurs sous-thématiques qui ont émergé lors de l'étude :

- le leader d'un projet industrie 4.0 ;
- la communication nécessaire lors d'un projet industrie 4.0 ;
- la recherche des compétences nécessaires, la formation versus le conseil ;
- la nécessaire simplification des outils de l'industrie 4.0 ; et
- la sélection des meilleurs moyens de mise en œuvre pour une PME.

Nous synthétisons les réponses des experts au sein des sous-sections ci-après.

4.4.3.1 LE LEADER DU PROJET DE DEPLOIEMENT

Dans le cadre d'un projet industrie 4.0, le leader du projet doit être choisi avec soin. Dans leur réponse, les experts sont mitigés quant à l'affirmation proposant de choisir un profil spécifique à l'industrie 4.0 (R2 – I6). Cependant, dans leurs commentaires, les experts précisent que les Allemands favorisent la sélection d'ingénieurs en mécanique et/ou en génie industriel qui apprennent les technologies liées à l'industrie 4.0.

De même, les experts précisent que l'industrie 4.0 nécessite des connaissances multidisciplinaires, mais également une ouverture d'esprit, de la curiosité et qu'il

faut connaître les métiers opérationnels afin de faire le lien entre les outils technologiques et les besoins industriels.

4.4.3.2 LA COMMUNICATION CONCERNANT LE PROJET

La communication autour d'un projet d'implantation de l'industrie 4.0 est importante. Plusieurs éléments peuvent présenter un risque vis-à-vis des collaborateurs.

Les experts notent que le risque concernant la santé et la sécurité pour les employés est maîtrisé (R3 – I2). Mais les experts notent aussi que les outils de l'industrie 4.0 peuvent être perçus par les employés comme des moyens de surveillance de leur travail quotidien (R2 – I5). Enfin, les experts notent que les métiers répétitifs et à faible valeur ajoutée sont fortement menacés de disparition avec les outils technologiques de l'industrie 4.0 (R3 – I4).

Les experts notent l'importance de la communication et de la transparence concernant les objectifs d'un projet industrie 4.0 (R1 – I9 et R1 – I11).

4.4.3.3 LA COMPÉTENCE : FORMATION VERSUS CONSEIL

L'une des clefs de l'industrie 4.0 est la compétence technique qui doit accompagner l'exploitation de ces technologies. Les experts notent que les PME manquent de compétence interne permettant l'exploitation des moyens de mise en œuvre de l'industrie 4.0 (R1 – I8), ils préconisent plusieurs voies pour combler ce manque.

L'une des possibilités est que la PME soit accompagnée par des experts extérieurs à l'entreprise. Par exemple, pour faire un audit préalable de l'état de l'outil de production et une cartographie des processus (R2 – I1). Une fois cet audit réalisé, la PME doit être accompagnée pour le choix des groupes technologiques à implanter (R2 – I15). Pour réaliser cet accompagnement, les experts préconisent de s'appuyer sur les équipes académiques (R1 – I10) même si certains experts précisent que les industriels sont parfois plus en avance que les chercheurs universitaires concernant l'industrie 4.0. Les experts sont mitigés concernant l'appel aux consultants extérieurs, le transfert de connaissance étant important pour assurer la pérennité d'un projet industrie 4.0, ce dernier n'est pas toujours assuré par les consultants extérieurs (R1 – I7).

La montée en compétence d'une PME peut également se faire par la formation des employés. Cette méthode est parfois plus longue que de faire appel à des consultants, mais elle favorise l'intégration des connaissances au sein de l'entreprise. Les experts notent que la formation régulière des employés favorise l'implantation de l'industrie 4.0 (R1 – I4, R2 – I13 et R3 – I7). Les experts précisent qu'il

est possible également de recruter de nouvelles compétences (R3 – I7), mais que les PME peinent à attirer des talents nécessaires à l'industrie 4.0 (R2 – I24).

Les experts affirment que les compétences et l'expertise sont les éléments clefs de l'industrie 4.0 et que les PME en manquent. Ainsi l'autre solution est la simplification des outils de l'industrie 4.0 pour favoriser leur implantation au sein de ces structures.

4.4.3.4 SIMPLIFIER LES OUTILS DE L'INDUSTRIE 4.0

Les experts notent que l'une des forces de l'offre de service orientée Cloud Computing est la simplicité d'utilisation pour les PME. Ainsi, les experts affirment également que la simplicité et l'accessibilité des solutions technologiques de l'industrie 4.0 favoriseront l'exploitation de ce concept pour ces entreprises (R3 – I5).

4.4.4 LES OPPORTUNITES OFFERTES PAR L'INDUSTRIE 4.0

Au-delà des deux thématiques que nous avons initialement identifiées, les experts ont proposé des affirmations à soumettre au panel d'experts s'orientant autour des opportunités offertes par les PME.

Deux visions de l'industrie 4.0 émergent de ces affirmations. Une première vision est une vision très orientée sur l'amélioration opérationnelle de l'entreprise, visant à augmenter la performance du processus de fabrication en diminuant le coût d'obtention de la valeur ajoutée. Une seconde vision s'oriente vers une modification des modèles d'affaires, considérant l'industrie 4.0 comme un vecteur d'innovation et de modification de l'offre commerciale des entreprises (R2 – I11), c.-à-d. proposer une meilleure valeur ajoutée parfois avec un coût d'obtention plus important.

Les experts s'accordent pour dire que l'industrie 4.0 est un facteur d'amélioration de la compétitivité des PME (R2 – I17). De même, les experts notent que l'industrie 4.0 peut aider à diminuer l'empreinte écologique des entreprises si celles-ci le souhaitent (R3 – I8).

Au cours de notre étude, nous avons volontairement proposé cinq affirmations « fermées » aux experts (R2 – I3, R2 – I6, R2 – I8, R2 – I9 et R2 – I10). Ces affirmations ont systématiquement reçu un avis mitigé, voire défavorable, de la part des experts. Cela semble traduire que l'industrie 4.0 présente de nombreuses possibilités et opportunités, mais qu'à l'heure actuelle, aucune stratégie de passage vers l'industrie 4.0 ne semble prévaloir sur les autres.

De même, les experts notent que l'industrie 4.0 en vue d'améliorer la performance opérationnelle des PME n'est pas nécessairement liée à la stratégie de passage à l'industrie 4.0 par le service ou par les produits (cf. section 3.2.1).

4.5 CONCLUSION DE L'ÉTUDE DELPHI-REGNIER

Nous avons trois objectifs avec l'étude que nous avons menée :

1. identifier les risques inhérents à l'adoption d'initiative 4.0 au sein des PME ;
2. identifier les opportunités issues du 4.0 pour améliorer la performance industrielle des PME ; et
3. identifier les facteurs critiques de succès pour l'implantation de l'industrie 4.0 au sein des PME.

Nous avons soumis à un panel d'expert plusieurs affirmations dans le but de confirmer ou d'infirmer ces affirmations. De par le modèle itératif de l'étude, les experts ont également proposé des affirmations à l'ensemble du panel ce qui nous a permis de répondre à nos objectifs tout en respectant le protocole de l'étude Delphi-Régnier.

Nous présentons ici les conclusions de l'étude. Dans une première sous-section, nous précisons les éléments suivant les trois objectifs fixés, puis dans une seconde sous-section nous développerons les limites et perspectives de l'étude.

4.5.1 LES REPONSES AUX OBJECTIFS

L'objectif de notre travail de recherche est de guider le dirigeant, ou tout autre collaborateur d'entreprise, dans l'exploitation des nouvelles technologies composant l'industrie 4.0. Pour cela, nous avons sélectionné au sein de notre étude les risques, les facteurs critiques de succès et les opportunités ayant obtenu une approbation des experts supérieurs à 80 % d'avis favorables de l'ensemble des répondants.

Nous précisons ces éléments dans les sous-sections suivantes.

4.5.1.1 LES RISQUES

Comme tout nouveau paradigme, le concept d'industrie 4.0 porte des risques concernant son implantation et son exploitation au sein d'une PME. Nous synthétisons ici les risques identifiés par les experts.

Le risque premier est le **manque d'expertise des PME**. Lors de l'analyse des caractéristiques effectuée au début de nos travaux de recherche, nous avons identifié que les PME étaient peu fournies en compétence concernant les fonctions supports. L'industrie 4.0 faisant appel à des technologies nouvelles et nécessitant plusieurs compétences, il n'est pas surprenant que les experts se positionnent sur ce risque.

Le second risque est la **stratégie à courte-vue des PME**. Les experts ont identifié l'importance d'inscrire la démarche industrie 4.0 dans une stratégie d'entreprise. Les experts ont précisé qu'il était possible d'envisager de petits chantiers d'amélioration localisés, mais lors du troisième questionnaire, moins de 60 % du panel ont confirmé cette proposition.

Le troisième risque identifié est la vitesse d'amélioration technologique faisant porter un risque **d'obsolescence sur les investissements technologiques des PME**. En effet, le temps de mise en œuvre et de maîtrise d'une technologie donnée, une autre plus performante (où la même améliorée) sera peut-être déjà exploitée par des concurrents. Cependant, ce risque est à mettre en perspective avec la faculté des PME à l'agilité et à la réactivité face aux environnements marchés. Cette agilité reste la force principale des PME.

Enfin, le dernier risque identifié par les experts est la **Crainte des employés de percevoir l'industrie 4.0 comme un moyen de surveillance accrue de leur travail**. Les experts conseillent de communiquer et d'être transparent sur l'utilisation des données ainsi captées au sein des ateliers.

Face à ces risques, les experts se sont également positionnés sur les facteurs critiques de succès favorisant ainsi l'implantation et l'exploitation de l'industrie 4.0.

4.5.1.2 LES FACTEURS CRITIQUES DE SUCCES

Trois facteurs critiques de succès ont été approuvés par l'ensemble du panel d'experts consulté. Le premier est **l'importance de la formation des employés**. Le manque de fonction support experte dans une PME est un élément maintes fois cité, il semble évident que la formation soit la clef pour contrer ce risque.

Le second facteur critique de succès est **la nécessité de faire une étude préalable à tout projet d'industrie 4.0** afin de cibler les besoins industriels de l'entreprise.

Le troisième facteur critique de succès est **l'exploitation régulière des données de l'entreprise**. Les collaborateurs et les entreprises dont l'habitude est d'exploiter les données disponibles considèrent qu'une valeur ajoutée est présente au sein de ces données. Les experts notent que les entreprises dans cette situation favorisent fortement la réussite d'un projet industrie 4.0.

Sans pour autant obtenir un consensus favorable de l'ensemble des experts, plusieurs autres facteurs critiques de succès ont été approuvés par plus de 80 % du panel.

La forte présence du dirigeant, caractéristique identifiée des PME, est un atout pour plusieurs facteurs. Premier facteur, l'importance de **communiquer avec les employés sur les objectifs** d'un projet industrie 4.0 afin d'écartier les craintes. Second facteur, **l'alignement de toute la ligne hiérarchique de l'entreprise**, courte dans le cas d'une PME. Les experts notent également l'importance pour **le dirigeant de participer à un réseau d'échange entre industriels** afin de se faire une opinion sur les possibilités offertes par l'industrie 4.0.

De nouveau pour contrer le risque de manque d'expertise, les experts préconisent d'accompagner les PME. Cependant, les experts sont très favorables à **l'accompagnement par des membres du monde académique**, mais pas par des membres de la sphère du conseil privé. Plusieurs experts ont précisé leurs craintes concernant la seconde option, relatives au transfert de connaissance pas toujours constaté lors de leur expérience respective.

Un projet d'industrie 4.0 est un projet impliquant parfois des changements importants. Les experts notent qu'un facteur critique de succès est **d'avoir une politique d'amélioration continue au sein de l'entreprise**. Cette politique favorise l'agilité des collaborateurs, et leur capacité à se mouvoir dans de nouvelles organisations et à exploiter de nouveaux outils.

Concernant les technologies, les experts sont très favorables à **l'exploitation des données et des outils de simulation**. Les autres groupes technologiques n'ont pas obtenu de consensus aussi fort que les deux cités. Les experts considèrent que les technologies tournant autour de la génération et exploitation des données sont efficaces, c.-à-d. qu'elles apportent de bons résultats pour un coût limité. Cependant, les experts précisent qu'une **bonne infrastructure informatique est nécessaire** pour générer, capter, stocker et analyser les données.

Enfin, les experts notent qu'un facteur critique de succès serait de **simplifier les outils de l'industrie 4.0** pour favoriser la pénétration de ces outils au sein des PME. Cette démarche diminuera l'impact du manque d'expertise constaté dans ces entreprises.

L'ensemble de ces facteurs de succès doit permettre de saisir de nouvelles opportunités liées à l'industrie 4.0. Nous détaillons ces opportunités au sein de la sous-section suivante.

4.5.1.3 LES OPPORTUNITES

Les experts n'ont pas trouvé de consensus concernant les opportunités offertes par l'industrie 4.0. Seule une affirmation présente un taux d'avis favorables supérieur à 80 %, il s'agit de **l'amélioration possible de la compétitivité** au sein des entreprises qui se lancent dans l'industrie 4.0. Par exemple, pas la diminution du coût de production en robotisant une tâche.

Cependant, les experts sont systématiquement restés « mitigés » lorsque les affirmations proposées étaient fermées. Il semble donc que l'industrie 4.0 présente plusieurs opportunités, mais que le facteur le plus important ne soit qu'au **sein de l'ensemble de ces possibilités aucune ne semble prévaloir sur les autres**.

4.5.2 LIMITES ET PERSPECTIVES

Nous précisons dans les sous-sections suivantes les limites de notre travail de recherche et les perspectives identifiées.

4.5.2.1 LES LIMITES

La première limite de cette étude concerne la méthode Delphi employée. Les méthodes Delphi sont très dépendantes du panel d'expert sélectionné par l'équipe de pilotage. Cependant, malgré la volonté de l'équipe de pilotage d'être neutre, le choix des experts comporte nécessairement un biais subjectif lié à l'identification des experts au sein des réseaux académiques et industriels exploités.

Le premier questionnaire était le résultat d'une analyse d'articles de recherche liée à des concepts considérés comme proche par l'équipe de pilotage, c.-à-d. les ERP, les MES, les projets d'amélioration continue notamment. Ce choix est particulièrement structurant pour l'initialisation de l'étude, même si les experts ont par

la suite proposé des affirmations eux-mêmes, l'orientation du premier questionnaire impose probablement un biais subjectif aux experts consultés concernant leur proposition.

Enfin, la méthode des abaques de Régnier est particulièrement adaptée à une étude de critères qualitatifs. Cependant, pour une étude plus quantitative, il faut réaliser une étude de type Delphi classique ; nous avons constaté au cours de l'étude que les questions fermées n'avaient pas fait consensus et que nous étions restés sur des tendances et des estimations qualitatives concernant l'industrie 4.0 dans les PME.

4.5.2.2 LES PERSPECTIVES

Suite à cette étude, plusieurs perspectives se dégagent, nous les présentons ici.

Notre travail permet d'identifier une liste non exhaustive des risques, facteurs critiques de succès et opportunités liés à l'industrie 4.0 dans les PME. Notre étude est prospective et qualitative, le manque de cas d'étude ne permettant pas d'effectuer une analyse statistique concrète. Pour effectuer ce travail, l'application d'une méthodologie de recherche par étude de terrain serait un moyen de confirmer, infirmer ou compléter la liste proposée par les experts.

De même, nous avons focalisé notre étude sur les PME. En France, la majorité des PME sont des entreprises dont le nombre d'employés est en moyenne proche de 25 employés alors que la définition pousse à 250 employés la limite pour considérer une entreprise comme une PME. Il est probable que les comportements d'une entreprise de 25 collaborateurs et de 250 collaborateurs soient différents face à des projets d'industrie 4.0. L'étude pourrait, dans l'hypothèse de la multiplication des cas d'application, se focaliser sur un découpage plus fin des catégories d'entreprise.

Plusieurs éléments sont encore inconnus suite à nos travaux. Par exemple, est-ce que l'industrie 4.0 doit être considérée comme un concept de connectivité, où bien comme un ensemble de technologies accessibles servant de boîte à outils aux dirigeants ? Est-ce que l'industrie 4.0 doit être exploitée pour modifier en profondeur les modèles d'affaires et ainsi favoriser l'émergence de nouveaux espaces d'affaires (Kim and Mauborgne, 2005)? Où bien, l'industrie 4.0 doit-elle servir à une augmentation de la compétitivité par la réduction des coûts de production et de fonctionnement des entreprises ?

Autre élément, comment lier les risques, opportunités et facteurs critiques de succès à un contexte particulier d'une PME ? Dans notre étude, nous avons considéré les PME comme un panel homogène, plusieurs auteurs soulignent cependant qu'il existe de fortes disparités entre les PME, liées à leur taille ou à leur secteur d'activité (Torres, 2008).

L'ensemble de ses questions doivent être levées afin de guider au mieux les dirigeants d'entreprise dans leur approche de l'industrie 4.0.

Conclusion et perspectives

Lorsque nous avons entrepris nos travaux, nous avons l'ambition d'aider les dirigeants d'entreprise, principalement les PME, à prendre conscience de l'importance de la révolution industrielle en cours. Nous souhaitons les guider dans leur choix technologique dans le but d'améliorer la performance industrielle. Le champ de l'industrie 4.0 est complexe. Au cours de nos travaux, nous avons identifié six objectifs plus restreints à atteindre.

Notre premier objectif était d'identifier les caractéristiques propres aux PME. Nous avons établi, suite à une étude de la littérature et une étude de terrain, une liste non exhaustive de caractéristiques propre aux PME. Cependant, nous avons également constaté qu'il est préférable de parler « des PME » plutôt que « de la PME » ; en effet l'univers des PME recèle de nombreuses entreprises diverses et variées, ayant parfois des forces et/ou des faiblesses différentes. Nous sommes convaincus que les caractéristiques identifiées sont fortement représentatives de la situation de la majorité des PME, nous savons également qu'il est probable de croiser sur le terrain des situations différentes.

Notre deuxième objectif était d'identifier les outils et techniques de l'industrie 4.0. Nous avons exploité les travaux du Boston Consulting Group pour donner une liste des moyens de mise en œuvre de l'industrie 4.0. Cet objectif est partiellement atteint, nos travaux aideront le dirigeant dans la compréhension des outils de l'industrie 4.0 existants. Cependant, les recherches sur l'industrie 4.0 sont nombreuses, plusieurs auteurs pourraient considérer une liste de moyens de mise-en-œuvre différente de la nôtre.

Notre troisième objectif était de recenser les cas documentés d'application de l'industrie 4.0. Nous avons appliqué une méthode de revue de littérature permettant d'identifier les cas empiriques au sein des PME, mais nous avons focalisé notre

recherche aux publications académiques. Cet objectif est atteint pour ce qui concerne les publications de recherche, mais un prolongement vers la littérature industrielle permettrait de répondre complètement à l'objectif fixé.

Nos trois derniers objectifs étaient d'identifier les risques, les opportunités et les facteurs critiques de succès associés à l'industrie 4.0 au sein des PME. Ces trois objectifs ont été atteints à l'aide d'une étude Delphi-Régnier réalisée au cours de nos travaux. Ce choix se justifiait par le manque de cas d'application documentés que nous avons constaté au cours de la revue de littérature et la difficulté d'effectuer des cas d'étude. L'atteinte de ces objectifs est dépendante des faiblesses de l'étude Delphi-Régnier que nous avons énoncées au sein de la section 4.5.2.1 relative aux limites de l'étude.

Au cours de nos travaux, de l'état de l'art et de l'étude Delphi-Régnier, nous avons montré que l'industrie 4.0 au sein des PME n'était pas triviale. L'expertise nécessaire et la formation résultante sont au cœur de la réussite d'un projet d'industrie 4.0 dans une PME. L'accompagnement des PME par des experts extérieurs est vivement conseillé, du moment que cet accompagnement se solde par un transfert de compétence rendant pérenne l'exploitation de l'industrie 4.0. D'autre part, le contexte spécifique des PME ne semble pas être un frein au projet d'industrie 4.0 ; si les PME subissent le manque de moyen et le manque d'expertise, elles profitent de l'agilité de l'organisation face aux changements à venir et de la capacité de l'entreprise à mobiliser l'ensemble des acteurs. L'étude a montré que la donnée (*data Analytics*), les outils de communication (*Cloud Computing*) et les outils de simulation étaient les plus favorables à une exploitation par les PME. Ces technologies sont maintenant abordables, faciles à mettre en œuvre et bien souvent favorisent l'exploitation des données déjà disponibles, mais sous-exploitées par les PME.

Le rôle clef du dirigeant de la PME a été mis en avant à plusieurs reprises. Il est un maillon concentrant la majorité des pouvoirs au sein de la PME, il peut ainsi mobiliser les acteurs dans un projet industrie 4.0 autant qu'être le premier à freiner, s'il n'est pas convaincu par les nouvelles technologies. Il est impossible de faire sans l'accord du dirigeant, il est nécessaire de convaincre avant de lancer un chantier industrie 4.0.

Lors de notre thèse, nous avons noté que l'industrie 4.0 présentait plusieurs opportunités sous forme d'un ensemble de moyens de mise en œuvre permettant de repenser la capacité managériale des entreprises en vue de l'amélioration de la compétitivité. Mais nous avons également noté qu'aucun vecteur d'utilisation

de l'industrie 4.0 ne prévalait sur les autres. Certes l'industrie 4.0 favorisera la compétitivité, mais suivant quel mode de progression : réduction des coûts de production ? Nouveaux produits et services ? Amélioration des délais ? Création de nouveaux réseaux de production ? Réactivité accrue pour saisir les opportunités du marché ?

Nous préconisons aux dirigeants de se tourner vers des réseaux industriels pour prendre conscience des possibilités offertes par l'industrie 4.0. Le monde évolue et les marchés changent, un retard concernant l'exploitation des nouvelles technologies pourrait être un retard insurmontable à rattraper.

Nous préconisons également au législateur de favoriser la formation, à la fois des futurs ingénieurs dont la vision pluridisciplinaire et l'ouverture d'esprit seront particulièrement nécessaires, mais également des travailleurs des PME, car le changement ne pourra venir qu'avec l'implication des collaborateurs opérationnels des entreprises. L'expertise est la clef de la réussite pour l'implantation de l'industrie 4.0, et le manque d'expertise dans ces entreprises est un frein évident au déploiement de ce nouveau paradigme.

L'industrie 4.0 est un vecteur d'innovation et un espace d'entrepreneuriat pour les entreprises. C'est une occasion unique de proposer de nouveaux modèles d'affaires par l'exploitation des nouvelles technologies. Nous pensons que l'industrie 4.0 est un espace de créativité, d'innovation et de nouvelles opportunités. Pas uniquement dans le but de réduire les coûts de production afin d'être plus compétitif, cela reviendrait à une course à la réduction des coûts qui n'est jamais une pratique profitant à l'ensemble d'un secteur (Kim and Mauborgne, 2005). L'industrie 4.0 doit être prise pour ce qu'elle est : une révolution industrielle, c'est-à-dire une rupture favorisant l'émergence de nouveaux modèles économiques. Pour cela, nous invitons les entreprises, qu'elles soient grandes ou petites, à favoriser des environnements innovants pour les nouvelles générations « *native digital* ». Les hommes et femmes de demain auront des connaissances poussées sur les technologies émergentes d'aujourd'hui, leur laisser des espaces d'entrepreneuriat au sein des entreprises est le meilleur moyen de favoriser la découverte de nouveaux modèles d'affaires, de nouveaux moyens de connexion avec les clients, de nouveaux produits dont les cycles de vie n'auront plus de secret ou encore de nouvelles méthodes d'apprentissage.

Les PME présentent un avantage certain, elles sont créatives et possèdent des structures organisationnelles qui s'adaptent facilement aux nouveaux défis. Elles ne doivent pas chercher à attirer des talents coûteux, mais à favoriser la formation

interne et la faculté d'innovation, cette stratégie différente de celle des grandes entreprises leur donnera un avantage concurrentiel.

Les recherches doivent explorer au-delà des groupes technologiques de l'industrie 4.0, les opportunités opérationnelles telles que les chantiers d'amélioration, les opportunités tactiques telles que les transformations d'usines permettant de produire plus efficacement, mais aussi les opportunités stratégiques visant de nouvelles perspectives de marché.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Phase des travaux de recherche et réponse aux objectifs	17
Figure 2 : Publication concernant les PME sur ScienceDirect depuis 2000	18
Figure 3 : modélisation de système selon Le Moigne (1974)	26
Figure 4 : Nombre de publications ScienceDirect répondant à "Industry 4.0"	31
Figure 5 : modélisation de la croissance des entreprises par L. GREINER	36
Figure 6 : modélisation d'une organisation d'après H. MINTZBERG	42
Figure 7 : modélisation d'une PME selon le modèle de H. MINTZBERG	43
Figure 8 : continuum entre les mécanismes de coordination	45
Figure 9 : les caractéristiques managériales des PME	47
Figure 10 : les 4 stades de la révolution industrielle	55
Figure 11 : les stratégies de passage vers l'industrie 4.0, source CEFRIO	57
Figure 12 : les groupes technologiques supports de l'industrie 4.0	58
Figure 13 : 4 capacités managériales du pilotage de système	61
Figure 14 : cadre d'analyse de la littérature scientifique	64
Figure 15 : stratégie de revue de la littérature	66
Figure 16 : nombre d'articles traitants de chaque objectif opérationnel	80
Figure 17 : nombre d'articles relatifs à chaque capacité managériale	81
Figure 18 : nombre d'articles traitant de chaque moyen de mise-en-œuvre	83
Figure 19 : présentation des réponses possibles pour une affirmation donnée	92
Figure 20 : création et évolution des questionnaires de l'étude Delphi-Régnier	97
Figure 21 : matrice des items, résultats premier questionnaire	144
Figure 22 : matrice brute, résultats premier questionnaire	145
Figure 23 : matrice des items, résultats deuxième questionnaire	157
Figure 24 : matrice brute, résultats deuxième questionnaire	158
Figure 25 : matrice des items, résultats troisième questionnaire	163
Figure 26 : matrice brute, résultats troisième questionnaire	163

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : quelques chiffres concernant les PME françaises (Chevalier, 2014)	28
Tableau 2 : caractéristiques des entreprises en fonction des phases de croissance (d'après L. GREINER, 1972)	39
Tableau 3 : article traitant des différents objectifs opérationnels	68
Tableau 4 : articles traitant des différentes capacités managériales	72
Tableau 5 : Articles traitant des différents moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0	74
Tableau 6 : Liste des CSF identifiés lors de la préétude Delphi-Régnier	96

Références bibliographiques

A

- Abernathy, W.J., Townsend, P.L., 1975. Technology, productivity and process change. *Technol. Forecast. Soc. Change* 7, 379–396. doi:10.1016/0040-1625(75)90015-3
- Achanga, P., Shehab, E., Roy, R., Nelder, G., 2006. Critical success factors for lean implementation within SMEs. *J. Manuf. Technol. Manag.* 17, 460–471. doi:10.1108/17410380610662889
- Adolphus, M., 2015. how to carry out a literature review for a dissertation or research paper [WWW Document]. URL <http://www.emeraldgroupublishing.com/research/guides/methods/literature2.htm> (accessed 1.1.16).
- Åhlström, P., 1998. Sequences in the implementation of lean production. *Eur. Manag. J.* 16, 327–334. doi:10.1016/S0263-2373(98)00009-7
- Ahmad, M.M., Pinedo Cuenca, R., 2013. Critical success factors for ERP implementation in SMEs. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 29, 104–111. doi:10.1016/j.rcim.2012.04.019
- Al-Mashari, M., 2002. Enterprise resource planning (ERP) systems: a research agenda. *Ind. Manag. {&} Data Syst.* 102, 165–170. doi:10.1108/02635570210421354
- Anact, 2013. LES METHODES D'ORGANISATION DU TRAVAIL : LE LEAN EN QUESTION.
- Aoyama, T., Naruoka, H., Koshijima, I., Watanabe, K., 2015. How Management Goes Wrong? – The Human Factor Lessons Learned from a Cyber Incident Handling Exercise. *Procedia Manuf.* 3, 1082–1087. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.178
- Aruväli, T., Maass, W., Otto, T., 2014. Digital Object Memory Based Monitoring Solutions in Manufacturing Processes. *Procedia Eng.* 69, 449–458. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.011
- Ashton, R.H., 1986. Combining the judgments of experts: How many and which ones? *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 38, 405–414. doi:10.1016/0749-5978(86)90009-9

Azevedo, A., Almeida, A., 2011. Factory Templates for Digital Factories Framework. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 27, 755–771. doi:10.1016/j.rcim.2011.02.004

B

- Babiceanu, R.F., Seker, R., 2016. Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Comput. Ind.* 81, 128–137. doi:10.1016/j.compind.2016.02.004
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., Lee, J., 2015. Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. *IFAC-PapersOnLine* 48, 1622–1627. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.318
- Baglin, G., Lamouri, S., Thomas, A., 2015. *Maîtriser les Progiciels ERP*. Ed. ECONOMICA, Paris.
- Baker, P., 2002. Why is Lean so far off? *Work. Manag.* 55, 26–29.
- Bao, Y., Ren, L., Zhang, L., Zhang, X., Luo, Y., 2012. Massive sensor data management framework in Cloud manufacturing based on Hadoop, in: *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*. IEEE, pp. 397–401. doi:10.1109/INDIN.2012.6301192
- Barenji, A.V., Barenji, R.V., Roudi, D., Hashemipour, M., 2016. A dynamic multi-agent-based scheduling approach for SMEs. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* doi:10.1007/s00170-016-9299-4
- Bauer, M., 1999. PME : Un Patronat aux trois visages, in: *Les Organisations : Etat Des Savoirs*. Sciences Humaines, Auxerre, France, pp. 173–178.
- Bayo-Moriones, A., Billón, M., Lera-López, F., 2013. Perceived performance effects of ICT in manufacturing SMEs. *Ind. Manag. Data Syst.* 113, 117–135. doi:10.1108/02635571311289700
- Becker, T., Wagner, D., 2016. Identification of Key Machines in Complex Production Networks. *Procedia CIRP* 41, 69–74. doi:10.1016/j.procir.2015.12.006
- Bi, Z., Cochran, D., 2014. Big data analytics with applications. *J. Manag. Anal.* 1, 249–265. doi:10.1080/23270012.2014.992985
- Bidet-Mayer, T., 2016. *Industrie du futur : une compétition mondiale*. Presses des MINES, Paris.
- Bonfanti, A., Del Giudice, M., Papa, A., 2015. Italian Craft Firms Between Digital Manufacturing, Open Innovation, and Servitization. *J. Knowl. Econ.* doi:10.1007/s13132-015-0325-9
- Bowles, J., 2014. The computerisation of European jobs [WWW Document]. URL <http://bruegel.org/2014/07/the-computerisation-of-european-jobs/> (accessed 7.31.17).

Brad, S., Murar, M., 2015. Employing Smart Units and Servitization towards Reconfigurability of Manufacturing Processes. *Procedia CIRP* 30, 498–503. doi:10.1016/j.procir.2015.02.154

Brynjolfsson, E., 1993. The Productivity Paradox of Information Technology. *Computing* 36, 77. doi:10.1145/163298.163309

C

Caggiano, A., Caiazzo, F., Teti, R., 2015. Digital Factory Approach for Flexible and Efficient Manufacturing Systems in the Aerospace Industry. *Procedia CIRP* 37, 122–127. doi:10.1016/j.procir.2015.08.015

Caggiano, A., Teti, R., 2013. Modelling, Analysis and Improvement of Mass and Small Batch Production through Advanced Simulation Tools. *Procedia CIRP* 12, 426–431. doi:10.1016/j.procir.2013.09.073

Cao, H., Folan, P., Potter, D., Browne, J., 2011. Knowledge-enriched shop floor control in end-of-life business. *Prod. Plan. Control* 22, 174–193. doi:10.1080/09537281003769980

Cappelletti, L., 2010. La Recherche-Intervention : Quels Usages En Controle De Gestion ? Congrès l'Association Francoph. *Comptab.* 1–25.

Cayiroglu, I., Demir, B.E., 2012. Computer assisted glass mosaic tiling automation. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 28, 583–591. doi:10.1016/j.rcim.2012.02.008

Chalal, M., Boucher, X., Marques, G., 2015. Decision support system for servitization of industrial SMEs: a modelling and simulation approach. *J. Decis. Syst.* 24, 355–382. doi:10.1080/12460125.2015.1074836

Chevalier, F., 2014. *Des PME aux ETI : les entreprises en croissance*, 1re éditio. ed. de boeck, Paris.

Constantinescu, C.L., Francalanza, E., Matarazzo, D., 2015. Towards Knowledge Capturing and Innovative Human-system Interface in an Open-source Factory Modelling and Simulation Environment. *Procedia CIRP* 33, 23–28. doi:10.1016/j.procir.2015.06.006

Constantinescu, C.L., Francalanza, E., Matarazzo, D., Balkan, O., 2014. Information Support and Interactive Planning in the Digital Factory: Approach and Industry-driven Evaluation. *Procedia CIRP* 25, 269–275. doi:10.1016/j.procir.2014.10.038

Cragg, P., Mills, A., 2011. IT support for business processes in SMEs. *Bus. Process Manag. J.* 17, 697–710. doi:10.1108/14637151111166141

Cullinan, C., Sutton, S.G., Arnold, V., 2010. Technology monoculture: ERP systems, 'techno-process diversity' and the threat to the information technology ecosystem. *Adv. Account. Behav. Res.* 13, 13–30.

doi:10.1108/S1475-1488(2010)0000013005

D

- Dalkey, N., Helmer, O., 1963. An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Manag. Sci.* doi:10.1287/mnsc.9.3.458
- Dangayach, G.S., Deshmukh, S.G., 2005. Advanced manufacturing technology implementation. *J. Manuf. Technol. Manag.* 16, 483–496. doi:10.1108/02656710210415703
- Dean, J., Ghemawat, S., 2008. MapReduce. *Commun. ACM* 51, 107. doi:10.1145/1327452.1327492
- Deep, A., Guttridge, P., Dani, S., Burns, N., 2008. Investigating factors affecting ERP selection in made-to-order SME sector. *J. Manuf. Technol. Manag.* 19, 430–446. doi:10.1108/17410380810869905
- Delen, D., Zaim, H., Kuzey, C., Zaim, S., 2013. A comparative analysis of machine learning systems for measuring the impact of knowledge management practices. *Decis. Support Syst.* 54, 1150–1160. doi:10.1016/j.dss.2012.10.040
- Denkena, B., Dengler, B., Doreth, K., Krull, C., Horton, G., 2014. Interpretation and optimization of material flow via system behavior reconstruction. *Prod. Eng.* 8, 659–668. doi:10.1007/s11740-014-0545-z
- Dijkman, R.M., Sprenkels, B., Peeters, T., Janssen, A., 2015. Business models for the Internet of Things. *Int. J. Inf. Manage.* 35, 672–678. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2015.07.008
- Dombrowski, U., Ernst, S., 2013. Scenario-based Simulation Approach for Layout Planning. *Procedia CIRP* 12, 354–359. doi:10.1016/j.procir.2013.09.061
- Dombrowski, U., Wagner, T., 2014. Mental Strain as Field of Action in the 4th Industrial Revolution. *Procedia CIRP* 17, 100–105. doi:10.1016/j.procir.2014.01.077
- Doom, C., Milis, K., Poelmans, S., Bloemen, E., 2010. Critical success factors for ERP implementations in Belgian SMEs. *J. Enterp. Inf. Manag.* 23, 378–406. doi:10.1108/17410391011036120
- Drew, J., McCallum, B., Roggenhofer, S., 2004. *Objectif Lean, Dixième ti.* ed. Eyrolles, Paris.

E

Entreprises, O. du financement des, 2014. Rapport sur la situation économique et

financière des PME.

Evangelista, P., Mckinnon, A., Sweeney, E., 2013. Technology adoption in small and medium-sized logistics providers 113, 967–989. doi:10.1108/IMDS-10-2012-0374

F

Fayol, H., 1917. Administration industrielle et générale. H. Dunod et E. Pinat, Paris.

Fornasiero, R., Zangiacomi, A., 2013. A structured approach for customised production in SME collaborative networks. *Int. J. Prod. Res.* 51, 2110–2122. doi:10.1080/00207543.2012.706718

Frey, C.B., Osborne, M.A., 2017. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technol. Forecast. Soc. Change* 114, 254–280. doi:10.1016/j.techfore.2016.08.019

G

Gallois, L., 2012. Pacte pour la compétitivité de l'industrie Française.

Garengo, P., Biazzo, S., Bititci, U.S., 2005. Performance measurement systems in SMEs: A review for a research agenda. *Int. J. Manag. Rev.* 7, 25–47. doi:10.1111/j.1468-2370.2005.00105.x

Givehchi, M., Haghghi, A., Wang, L., 2015. Generic machining process sequencing through a revised enriched machining feature concept. *J. Manuf. Syst.* 37, 564–575. doi:10.1016/j.jmsy.2015.04.004

Gordon, T., Helmer, O., 1964. Report on a Long-Range Forecasting Study, The Rand Corporation.

Greiner, L., 1972. Evolution and Revolution as Organizations Grow - Harvard Business Review. *Harv. Bus. Rev.* 76, 55–68.

H

Haddara, M., Zach, O., 2011. ERP Systems in SMEs: A Literature Review, in: 2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, pp. 1–10. doi:10.1109/HICSS.2011.191

Hao, Y., Helo, P., 2015. The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing: A case study. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* doi:10.1016/j.rcim.2015.10.001

- Hao, Y., Helo, P., Shamsuzzoha, A., 2016. Virtual factory system design and implementation: integrated sustainable manufacturing. *Int. J. Syst. Sci. Oper. Logist.* 2674, 1–17. doi:10.1080/23302674.2016.1242819
- Héraud, J.A., Munier, F., Nanopoulos, K., 1997. Méthode Delphi : une étude de cas sur les technologies du futur. *Futuribles* 218, 33–53.
- Herdon, M., Várallyai, L., Péntek, Á., 2012. Digital business ecosystem prototyping for SMEs. *J. Syst. Inf. Technol.* 14, 286–301. doi:10.1108/13287261211279026
- Hobbs, D.P., 2011. *Applied Lean Business Transformations : A complete project management approach.* J.ROSS Publishing.
- Holtewert, P., Wutzke, R., Seidelmann, J., Bauernhansl, T., 2013. Virtual Fort Knox Federative, Secure and Cloud-based Platform for Manufacturing. *Procedia CIRP* 7, 527–532. doi:10.1016/j.procir.2013.06.027
- Horbach, S., Ackermann, J., Müller, E., Schütze, J., 2011. Building blocks for adaptable factory systems. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 27, 735–740. doi:10.1016/j.rcim.2010.12.011
- Huang, B., Li, C., Yin, C., Zhao, X., 2013. Cloud manufacturing service platform for small- and medium-sized enterprises. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 65, 1261–1272. doi:10.1007/s00170-012-4255-4
- Ifinedo, P., 2007. Interactions Between Organizational Size , Culture , and Structure and Some It Eactors in the Context of Erp Success Assessment : an Exploratory Investigation. *Inf. Manag. Comput. Secur.* 15, 270–282. doi:http://dx.doi.org/10.1108/09685220710817798

I

- Ismail Salaheldin, S., 2009. Critical success factors for TQM implementation and their impact on performance of SMEs. *Int. J. Product. Perform. Manag.* 58, 215–237. doi:10.1108/17410400910938832

K

- Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K.-D., Pannek, J., 2016. A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments. *Logist. Res.* 9, 23. doi:10.1007/s12159-016-0151-x
- Kim, W.C., Mauborgne, R., 2005. *Stratégie Océan Bleu : comment créer de nouveaux espaces stratégiques.* Harvard Business School Publishing Corporation.

- Kohler, D., Weisz, J.-D., 2016. Industrie : Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand. Paris.
- Kohler, D., Weisz, J.-D., 2015. Industrie 4.0 : quelles stratégies numériques ? 1–67.
- Kolberg, D., Zühlke, D., 2015. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-PapersOnLine* 48, 1870–1875. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.359
- Kopacek, P., 2015. Automation and TECIS. *IFAC-PapersOnLine* 48, 21–27. doi:10.1016/j.ifacol.2015.12.050
- Kumar, M., Antony, J., Douglas, A., 2009. Does size matter for Six Sigma implementation? *TQM J.* 21, 623–635. doi:10.1108/17542730910995882

L

- Le Moigne, J.-L., 1974. Les systèmes de décision dans les organisations. Paris.
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A., 2015. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Lee, J., Han, S., Yang, J., 2011. Construction of a computer-simulated mixed reality environment for virtual factory layout planning. *Comput. Ind.* 62, 86–98. doi:10.1016/j.compind.2010.07.001
- Lee, J., Kao, H.-A., Yang, S., 2014. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP* 16, 3–8. doi:10.1016/j.procir.2014.02.001
- Liker, J.K., 2007. The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer, *Action Learning: Research and Practice*. doi:10.1080/14767330701234002
- Loh, T.C., Koh, S.C.L., 2004. Critical elements for a successful enterprise resource planning implementation in small-and medium-sized enterprises. *Int. J. Prod. Res.* 42, 3433–3455. doi:10.1080/00207540410001671679
- Luo, X., Li, W., Tu, Y., Xue, D., Tang, J., 2011. Operator allocation planning for reconfigurable production line in one-of-a-kind production. *Int. J. Prod. Res.* 49, 689–705. doi:10.1080/00207540903555486

M

- M. Beheshti, H., K. Blaylock, B., A. Henderson, D., G. Lollar, J., 2014. Selection and critical success factors in successful ERP implementation. *Compet. Rev.* 24, 357–375. doi:10.1108/CR-10-2013-0082

- MacKerron, G., Kumar, M., Kumar, V., Esain, A., 2014. Supplier replenishment policy using e-Kanban: A framework for successful implementation. *Prod. Plan. Control* 25, 161–175. doi:10.1080/09537287.2013.782950
- Maleki, K., 2009. *Méthodes quantitatives de consultations d'experts*, Editions P. ed. Publibook, Paris.
- Masood, T., Weston, R., Rahimifard, A., 2013. A model-driven approach to enabling change capability in SMEs. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 69, 805–821. doi:10.1007/s00170-013-4853-9
- Matsuda, M., Sudo, Y., Kimura, F., 2016. A Multi-agent Based Construction of the Digital Eco-factory for a Printed-circuit Assembly Line. *Procedia CIRP* 41, 218–223. doi:10.1016/j.procir.2015.12.061
- Mauricio-Moreno, H., Miranda, J., Chavarría, D., Ramírez-Cadena, M., Molina, A., 2015. Design S3-RF (Sustainable x Smart x Sensing - Reference Framework) for the Future Manufacturing Enterprise. *IFAC-PapersOnLine* 48, 58–63. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.058
- Mehrsai, A., Henriksen, B., Røstad, C.C., Hribernik, K.A., Thoben, K.-D., 2014. Make-to-XGrade for the Design and Manufacturing of Flexible, Adaptive, and Reactive Products. *Procedia CIRP* 21, 199–205. doi:10.1016/j.procir.2014.03.147
- Michniewicz, J., Reinhart, G., 2016. Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks. *Mechatronics* 34, 170–180. doi:10.1016/j.mechatronics.2015.04.012
- Ministère de l'économie, 2017. *Nouvelle France Industrielle : l'industrie du futur* [WWW Document]. URL <https://www.economie.gouv.fr/nouvelle-france-industrielle/industrie-du-futur> (accessed 8.19.17).
- Mintzberg, H., 1982. *Structure et Dynamique des organisations*, Vingt-trois. ed. Eyrolles.
- Mirdamadi, S., 2009. *Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution*. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Eburdy, R., Tamayo, S., 2017a. Industry 4.0 and the SME: a technology-focused review of the empirical literature, in: 7th IESM Conference. Saaebrücken, Germany.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo, S., Barbaray, R., 2017b. Les moyens de mise-en-œuvre de l'industrie 4.0 pour le pilotage industrie des PME, in: 12e Édition Du Congrès International de Génie Industriel. Compiègne, France.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo, S., Barbaray, R., 2017c. Le Juste à temps dans les PME à l'ère de l'industrie 4.0, in: 15e Colloque National AIP-Priméca. La Plagne, France.
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., Barbaray, R., 2017d. The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *Int. J. Prod.*

Res. 7543, 1–19. doi:10.1080/00207543.2017.1372647

Moeuf, A., Tamayo, S., Lamouri, S., Pellerin, R., Lelievre, A., 2016. Strengths and weaknesses of small and medium sized enterprises regarding the implementation of lean manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* 49, 71–76. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.552

Moeuf, A., Tamayo, S., Lamouri, S., Pellerin, R., Lelievre, A., 2015. Difficultés d'implémentation du Lean Manufacturing dans les Petites et Moyennes Entreprises, in: 11e Édition Du Congrès International de Génie Industriel. Quebec, Canada.

Mostafa, S., Dumrak, J., Soltan, H., 2013. A framework for lean manufacturing implementation. *Prod. Manuf. Res.* 1, 44–64. doi:10.1080/21693277.2013.862159

N

Nandi, M.L., Kumar, A., 2016. Centralization and the success of ERP implementation. *J. Enterp. Inf. Manag.* 29, 728–750. doi:10.1108/JEIM-07-2015-0058

O

Ohno, T., 1988. *The Toyota Production System — Beyond Large-Scale Production*, CRC Press.

P

Peng, G., Jiang, Y., Xu, J., Li, X., 2012. A collaborative manufacturing execution platform for space product development. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 62, 443–455. doi:10.1007/s00170-011-3837-x

Pettersen, J., 2008. Defining lean production: some conceptual and practical issues. *TQM J.* 21, 127–142.

Porter, M., Heppelmann, J.E., 2014. How Smart , Connected Products Are Transforming Competition. *Harv. Bus. Rev.*

R

Raymond, L., 2005. *Operations management and advanced manufacturing*

technologies in SMEs. *J. Manuf. Technol. Manag.* 16, 936–955.
doi:10.1108/17410380510627898

Ren, L., Zhang, L., Tao, F., Zhao, C., Chai, X., Zhao, X., 2015. Cloud manufacturing: from concept to practice. *Enterp. Inf. Syst.* 9, 186–209.
doi:10.1080/17517575.2013.839055

Ruessmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M., 2015. Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries.

Ryu, D.H., Kim, H., Um, K., 2009. Reducing security vulnerabilities for critical infrastructure. *J. Loss Prev. Process Ind.* 22, 1020–1024.
doi:10.1016/j.jlp.2009.07.015

S

Saenz de Ugarte, B., Artiba, a., Pellerin, R., 2009. Manufacturing execution system – a literature review. *Prod. Plan. Control* 20, 525–539.
doi:10.1080/09537280902938613

Saraph, J. V., Benson, P.G., Schroeder, R.G., 1989. An Instrument for Measuring the Critical Factors of Quality Management. *Decis. Sci.* 20, 810–829.
doi:10.1111/j.1540-5915.1989.tb01421.x

Schumacher, A., Erol, S., Sihn, W., 2016. A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP* 52, 161–166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040

Segura Velandia, D.M., Kaur, N., Whittow, W.G., Conway, P.P., West, A.A., 2016. Towards industrial internet of things: Crankshaft monitoring, traceability and tracking using RFID. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 41, 66–77. doi:10.1016/j.rcim.2016.02.004

Seiger, R., Keller, C., Niebling, F., Schlegel, T., 2015. Modelling complex and flexible processes for smart cyber-physical environments. *J. Comput. Sci.* 10, 137–148. doi:10.1016/j.jocs.2014.07.001

Sena Ferreira, P., Shamsuzzoha, A.H.M., Toscano, C., Cunha, P., 2012. Framework for performance measurement and management in a collaborative business environment. *Int. J. Product. Perform. Manag.* 61, 672–690. doi:10.1108/17410401211249210

Seuring, S., Gold, S., 2012. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. *Supply Chain Manag. An Int. J.* 17, 544–555.
doi:10.1108/13598541211258609

Shamsuzzoha, A., Toscano, C., Carneiro, L.M., Kumar, V., Helo, P., 2016. ICT-based solution approach for collaborative delivery of customised products. *Prod. Plan. Control* 27, 280–298. doi:10.1080/09537287.2015.1123322

- Shaul, L., Tauber, D., 2012. CSFs along ERP life-cycle in SMEs: a field study. *Ind. Manag. Data Syst.* 112, 360–384. doi:10.1108/02635571211210031
- Skinner, W., 1986. The productivity paradox. *Harv. Bus. Rev.*
- Somers, T.M., Nelson, K., 2001. The impact of critical success factors across the stages of enterprise resource planning implementations, in: *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE Comput. Soc, p. 10. doi:10.1109/HICSS.2001.927129
- Song, T., Liu, H., Wei, C., Zhang, C., 2014. Common engines of cloud manufacturing service platform for SMEs. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73, 557–569. doi:10.1007/s00170-014-5863-y

T

- Terkaj, W., Tolio, T., Urgo, M., 2015. A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 64, 451–454. doi:10.1016/j.cirp.2015.04.121
- Torres, O., 1999. Les PME.
- Tranfield, D., Denyer, D., Smart, P., 2003. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review *. *Br. J. Manag.* 14, 207–222. doi:10.1111/1467-8551.00375
- Trappey, A.J.C., Trappey, C. V., Hareesh Govindarajan, U., Chuang, A.C., Sun, J.J., 2016. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Adv. Eng. Informatics*. doi:10.1016/j.aei.2016.11.007
- Trebuña, P., Popovič, R., Kłos, S., 2014. Methodology of the Creation of Human and Robot Operation in the Tecnomatix Process Simulate. *Procedia Eng.* 96, 483–488. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.119

V

- Van De Ven, A.H., Delbecq, A.L., 1974. The Effectiveness of Nominal, Delphi, and Interacting Group Decision Making Processes. *Acad. Manag. J.* 17, 605–621.
- Vassell, C., 1999. Computer Integrated Manufacturing , and Small and Medium Enterprises. *Comput. Ind. Eng.* 37, 425–428.
- Veza, I., Mladineo, M., Gjeldum, N., 2015. Managing Innovative Production Network of Smart Factories. *IFAC-PapersOnLine* 48, 555–560. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.139

W

- Wang, L., Törngren, M., Onori, M., 2015. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *J. Manuf. Syst.* 37, 517–527. doi:10.1016/j.jmsy.2015.04.008
- Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, C., 2016. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. *Int. J. Distrib. Sens. Networks* 2016, 1–10. doi:10.1155/2016/3159805
- Wang, X.V., Wang, L., 2016. A cloud-based production system for information and service integration: an internet of things case study on waste electronics. *Enterp. Inf. Syst.* 7575, 1–17. doi:10.1080/17517575.2016.1215539
- Wang, X.V., Xu, X.W., 2013. An interoperable solution for Cloud manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 29, 232–247. doi:10.1016/j.rcim.2013.01.005
- Wells, L.J., Camelio, J.A., Williams, C.B., White, J., 2014. Cyber-physical security challenges in manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 2, 74–77. doi:10.1016/j.mfglet.2014.01.005
- Womack, J.P., Daniel, T.J., 2003. *Lean thinking*, First Free. ed. Simon & Schuster, Inc.
- Womack, J.P., Jones, D.T., Roos, D., 1990. *The machine that changed the world*. Simon & Schuster, Inc.

X

- Xia, M., Li, T., Zhang, Y., de Silva, C.W., 2016. Closed-loop design evolution of engineering system using condition monitoring through internet of things and cloud computing. *Comput. Networks* 101, 5–18. doi:10.1016/j.comnet.2015.12.016
- Xu, X., 2012. From cloud computing to cloud manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 28, 75–86. doi:10.1016/j.rcim.2011.07.002

Y

- Yang, C., Su, Y., 2009. The relationship between benefits of ERP systems implementation and its impacts on firm performance of SCM. *J. Enterp. Inf. Manag.* 22, 722–752. doi:10.1108/17410390910999602
- Yue, X., Cai, H., Yan, H., Zou, C., Zhou, K., 2015. Cloud-assisted industrial cyber-physical systems: An insight. *Microprocess. Microsyst.* 39, 1262–

1270. doi:10.1016/j.micpro.2015.08.013

Yusof, S.M., Aspinwall, E.M., 2000. Critical success factors in small and medium enterprises: Survey results. *Total Qual. Manag.* 11, 448–462.
doi:10.1080/09544120050007760

Z

Zellner, G., 2011. A structured evaluation of business process improvement approaches. *Bus. Process Manag. J.* 17, 203–237.
doi:10.1108/14637151111122329

Annexe 1 : Synthèse questionnaire N° 1 – Étude Delphi-Régnier

Synthèse

Lors du premier tour de l'étude Delphi, les experts se sont exprimés sur un ensemble d'affirmations. Plusieurs idées se dégagent de ce premier tour, nous synthétisons ici ces idées. Dans une seconde section, nous présentons en détail, item par item, les opinions des experts. Nous présentons en conclusion les matrices colorées de l'étude (Figure 21 et Figure 22).

Thème organisationnel

Les PME **manquent d'expertise**, les fonctions supports sont bien souvent peu développées. Les experts notent **l'importance de la formation** pour l'industrie 4.0 comme le montrent les **items 4 et 8**.

L'appui sur **des expertises extérieures** semble favoriser l'exploitation de l'industrie 4.0. Les experts sont très favorables à l'appui sur les équipes de recherche académique (**item 10**, 75 % d'avis favorables), mais moins sur les équipes de consultants (**item 7**, 58 % d'avis favorables).

La proximité entre les différents acteurs de la PME, cadre et employés, favorise l'exploitation de l'industrie 4.0. La clarté dans le partage des informations et les objectifs concernant le projet et l'agilité de la PME favorisée par l'absence de décomposition fonctionnelle sont des atouts pour l'industrie 4.0. **Les items 9, 11 et 6** en sont le reflet.

Cependant, les experts **sont mitigés sur la centralisation du pouvoir dans les mains du cadre (item 2)**, si le cadre présente un profil "early adopter", il est probable que cela favorise l'exploitation de l'industrie 4.0. Dans ce cas, le cadre participera probablement à des groupes d'entreprises de partage de ressources (**item 12**) et lancera

des chantiers d'amélioration sans attendre de projet "industrie 4.0" formel (**item 5**). La centralisation du pouvoir décisionnel favorise également la mise à disposition des moyens nécessaires à un projet digital (**item 1**).

La présence opérationnelle du cadre favorise également l'aspect "courte vue" de la stratégie de l'entreprise, qui présente un fort risque pour l'exploitation de l'industrie 4.0 (**item 3 et 1**). De même, si un cadre n'est pas favorable à l'industrie 4.0, son pouvoir au sein de l'organisation sera un frein important à tout projet d'industrie 4.0.

Ainsi, il apparaît dans ce premier tour que le rôle de la formation et de l'expertise ne fait aucun doute, mais que **le rôle du cadre peut-être favorable, où défavorable en fonction des considérations et du comportement de ce dernier**. Nous visons à valider ces éléments dans le second tour.

Thème technique

Les experts considèrent que la donnée et son exploitation par les PME sont la clef de l'industrie 4.0 dans les PME comme le montrent les **items 15 et 16**. Pour cela, l'infrastructure IT (Technologies de l'Information) est importante même si certains experts précisent que des sociétés de service proposent de plus en plus d'infrastructures distantes fonctionnelles (**item 24**).

Malgré l'importance de la donnée, les experts sont mitigés sur plusieurs points concernant les données dans les PME :

Les PME ne génèrent pas assez de données actuellement, toutefois cela pourrait changer par une instrumentalisation de l'outil de production (**item 22**).

Les PME manquent de compétence pour exploiter les données, mais une confusion était présente dans le questionnaire entre analyse *Big Data*, *Data Analytics* et *Data Mining* (**item 19 et 21**). Nous visons à lever cette confusion dans le second tour de l'étude.

Les experts considèrent que l'exploitation des technologies support des flux d'informations (Cloud Computing et Cybersécurité) favorise la performance industrielle (**item 14**), mais que la cybersécurité reste sous-considérée par les PME (**item 23**).

Les experts sont mitigés sur l'aspect financier de l'industrie 4.0 (**item 20**). Les experts précisent toutefois qu'il est important de cibler les problèmes de l'entreprise et de sélectionner les moyens de les résoudre. Par exemple, les technologies CPS, robot

collaboratif et M2M laissent les experts mitigés, d'une part il s'agit des groupes technologiques les plus coûteux (**item 13**), mais d'autre part ils peuvent être les vecteurs de nouvelles opportunités d'affaires importantes. Les experts sont favorables à dire que l'important n'est pas d'implanter l'ensemble des groupes technologiques, mais de se focaliser sur ceux qui répondent à des problématiques que connaissent les PME (**item 18**).

La technologie clef permettant de simuler et de vérifier les possibilités d'amélioration est la simulation selon les experts (**item 17**). Toutefois, les experts précisent que d'une part tout n'est pas mesurable, et d'autre part que le temps, les compétences et l'investissement nécessaires à une simulation ne sont pas toujours compatibles avec la dynamique de l'entreprise.

Commentaires Item par Item

Les items sont présentés par ordre de consensus positif décroissant (Consensus pour) et sont divisés dans les deux grandes thématiques d'étude : organisationnelle et technique.

Thématique organisationnelle

ITEM 4 : La formation régulière des employés favorise l'implantation de l'industrie 4.0

100 % d'avis favorables.

Les experts estiment que les employés sont le moteur du changement et que la formation est un moyen de les intégrer à la démarche. Même si l'ensemble d'experts a été d'accord avec cet item, certains considèrent que la formation régulière des employés est rare au sein des PME.

ITEM 5 : Une politique d'amélioration continue interne favorise l'implantation de l'industrie 4.0

83 % d'avis favorables et 17 % des avis mitigés.

Les experts considèrent que l'amélioration continue permet de développer l'agilité, composante essentielle de l'industrie 4.0. Les experts précisent que de manière générale, l'amélioration continue favorise les changements de processus (ISO, Lean, Industrie 4.0).

Les avis mitigés soulignent que cette politique n'est pas essentielle pour faire des progrès au sein des PME. Certaines PME ont fait des progrès intéressants sans pour autant lancer de politique d'amélioration continue, en s'appuyant toutefois sur des consultants experts.

ITEM 12 : Participer activement à un réseau d'entreprise (virtual entreprise) favorise l'implantation de l'industrie 4.0

83 % d'avis favorables et 17 % d'avis mitigés.

Les experts ont constaté l'importance de la participation dans des réseaux d'entreprise dans des programmes d'implantation de Lean Manufacturing et d'amélioration continue. Le partage des informations et des expériences permet d'éviter des problèmes que d'autres entreprises ont déjà résolus.

ITEM 9 : La communication directe entre le cadre et les employés d'une PME favorise l'implantation de l'industrie 4.0

83 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis mitigés et 8,5 % ne savent pas.

La transparence et la clarté du partage des objectifs et des enjeux permettent de motiver le groupe et d'éviter des phénomènes de blocage.

Les experts ayant donné une opinion mitigée pour cette affirmation considèrent que tout dépend de l'environnement de travail et du type de stratégie implantée. Des activités telles que l'automatisation des activités de production et le contrôle de la qualité ne sont pas impactées par la communication ; pour le suivi des KPI et le suivi en temps réel de la production, la communication est un atout.

ITEM 3 : La vision à courte vue des PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0

83 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis mitigés et 8,5 % d'avis qui ne sont pas du tout d'accord avec l'affirmation.

Les experts ayant donné un avis favorable pour cette affirmation ont remarqué que la vision à courte vue découle du manque de ressource, des changements fréquents de priorités et le respect des commandes en cours.

Cependant, certains éléments simples de l'industrie 4.0, comme le suivi de production en temps réel, peuvent être implantés rapidement sans avoir une stratégie à long terme. De manière plus générale, l'industrie 4.0 doit répondre à un besoin de l'entreprise qui ne sera pas nécessairement un besoin d'envergure important et nécessitant une stratégie sur le long terme.

ITEM 10 : S'appuyer sur des équipes de recherche académique favorise l'implantation de l'industrie 4.0 pour les PME

83 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis mitigés et 8,5 % d'avis qui ne sont pas d'accord avec l'affirmation.

Les experts ayant donné un avis favorable considèrent que la neutralité et le développement des connaissances dans le milieu universitaire peuvent favoriser l'implantation de l'industrie 4.0 au sein des PME. Cependant, ils remarquent qu'il est important que les équipes de recherche aient une bonne compréhension des réalités des PME.

Les experts soulèvent également le risque d'une divergence d'objectif entre le monde académique et le monde industriel. Alors que la recherche prend le temps d'étudier les concepts, les industriels sont en recherche de méthodes finalisées et pragmatiques d'implantation de l'industrie 4.0.

Enfin, les experts précisent qu'aujourd'hui, le concept industrie 4.0 est plus poussé par le monde industriel que par le monde académique.

ITEM 11 : La proximité entre les collaborateurs d'une PME favorise l'implantation de l'industrie 4.0

83 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis n'étant pas d'accord et 8,5 % ne savent pas répondre avec l'affirmation.

8,5 % des experts considèrent que la compétence et l'expérience sont des facteurs de réussite plus importants que la proximité seule.

La proximité des collaborateurs favorise les ajustements mutuels et l'agilité nécessaire à l'industrie 4.0.

ITEM 8 : Le manque de compétences des PME est un facteur de risque important pour l'implantation de l'industrie 4.0

66 % d'avis favorables et 34 % d'avis mitigés.

Les experts considèrent que le manque de compétence est un facteur de risque. Les experts précisent toutefois qu'il est possible de favoriser la formation, même si cela reste difficile dans un environnement où le temps réel (changement de priorités par exemple) prend le pas sur les actions pour le long terme (projet de formation et implantation 4.0).

ITEM 1 : Dans une PME, le cadre ayant une forte présence opérationnelle favorise l'implantation de l'industrie 4.0

58 % d'avis favorables, 33,5 % d'avis mitigés et 8,5 % ne savent pas.

D'après les experts, un cadre ayant une forte présence opérationnelle est capable d'équilibrer les moyens digitaux avec les objectifs de la PME.

Cependant, les experts précisent que l'attitude du cadre face à la technologie est un point essentiel. Si ce dernier est opposé à la technologie, il sera le frein le plus important au projet.

ITEM 7 : Avoir l'habitude de s'appuyer sur des consultants pour les projets de l'entreprise favorise l'implantation de l'industrie 4.0

58 % d'avis favorables, 33,5 % d'avis mitigés et 8,5 % d'avis en désaccord avec la proposition.

Les avis favorables ont été motivés par la capacité des consultants à apporter un regard nouveau sur une situation donnée, ainsi que sur l'expérience et l'expertise qu'ils peuvent amener dans l'entreprise. Cependant, l'ensemble des avis favorables est en vert pâle.

Les experts sont mitigés sur le risque de l'appel aux consultants. La transmission de la connaissance au sein de l'entreprise, avant le départ des consultants, n'est pas toujours assurée.

Les avis défavorables viennent de mauvaises expériences avec les consultants. Les équipes de consultant prennent en charge 20 % du travail qui apporte 80 % des résultats, et laisse aux équipes locales les 80 % du travail pour obtenir les 20 % de résultat restant, mais nécessaire à la pérennité du projet.

Enfin, les experts constatent que l'appel aux consultants tend à augmenter le volume et le coût des projets.

ITEM 2 : La centralisation du pouvoir décisionnel sur le cadre de la PME favorise l'implantation de l'industrie 4.0

33 % d'avis favorables, 41 % d'avis mitigés et 16 % d'avis en désaccord avec l'affirmation.

Les experts ayant donné un avis mitigé considèrent qu'au-delà de la centralisation, le type d'individu est un facteur plus important. Un cadre conservateur ne promouvra pas l'implantation de l'industrie 4.0. Contrairement, un « early adaptor » cherchera à implanter rapidement.

D'autres experts considèrent un risque entre l'industrie 4.0 et les PME, alors que la PME connaît un pouvoir centralisé, l'industrie 4.0 tend à distribuer la prise de décision via le partage d'informations. Ainsi, il y a un besoin de consensus sur l'évolution de l'entreprise lors de l'implantation de l'industrie 4.0.

ITEM 6 : L'absence de décomposition fonctionnelle dans une PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0

17 % d'avis favorables, 25 % d'avis mitigés, 33 % d'avis en désaccord et 25 % ne savent pas répondre.

Les avis mitigés et en désaccord s'appuient sur le fait que l'absence de décomposition peut être un facteur d'agilité, proximité et flexibilité. Ils estiment donc qu'une telle absence est plutôt favorable.

25 % des répondants ne savent pas donner d'opinion concernant à cette affirmation, d'après les commentaires des experts, cette question manque de clarté. Nous donnons une définition plus précise dans la section suivante et nous reposerons la question lors du deuxième tour.

Thématique technique

ITEM 16 : Les PME qui exploitent leurs données afin de s'améliorer ont moins de risque d'échec lors d'une implantation de l'industrie 4.0

100 % d'avis favorables.

Les experts ont remarqué l'importance de récupérer les données dans le but de mesurer l'impact des décisions prises.

Les experts signalent également que, souvent, les PME n'exploitent pas les données qu'elles possèdent.

ITEM 15 : L'exploitation des technologies générant des données (lot Internet des Objets) est une clef pour la performance industrielle d'une PME

92,5 % d'avis favorables et 8,5 % d'avis mitigés.

La récupération des données permet de mesurer plusieurs valeurs choisies tout au long du cycle de vie du produit : approvisionnement, production et exploitation par le client.

À l'aide de ces données, les entreprises améliorent les produits et augmentent la valeur ajoutée des produits.

ITEM 17 : La simulation est une technologie clef pour l'amélioration de la performance industrielle des PME

92,5 % d'avis favorables et 8,5 % d'avis mitigés.

Cette affirmation fait consensus. Cependant, les experts précisent d'une part que tout ne peut pas être simulé, et que d'autre part les PME n'ont pas toujours les compétences en interne pour porter la simulation.

D'autre part, même si la simulation est un outil puissant, tous les problèmes de l'entreprise ne méritent pas une simulation poussée.

ITEM 24 : L'infrastructure IT est un élément clef de la réussite de l'implantation de l'industrie 4.0

93 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis mitigés et 8,5 % d'opinions défavorables.

Les experts considèrent que l'infrastructure IT facilite l'exploitation des données, et qu'un minimum est requis.

Cependant, les experts précisent qu'actuellement, de nombreuses entreprises de service proposent des outils informatiques avec accès à distance. Ainsi, les PME n'ont pas besoin d'avoir une forte infrastructure IT en interne, mais simplement une bande passante pour accéder aux services à distance.

ITEM 23 : La Cyber-Sécurité est sous-considérée par les PME

74,5 % d'avis favorables, 8,5 % d'avis mitigés et 17 % ne savent pas répondre.

Les experts expliquent qu'il s'agit d'un problème majeur pour les entreprises. Cette sous-considération provient d'une part d'un manque de connaissance interne pour exploiter des solutions, et de l'autre d'un manque d'investissement dans des systèmes tiers de qualité.

Les experts soulignent que certaines PME commencent à prendre conscience de ce risque.

ITEM 14 : L'implantation des technologies supportant les flux d'informations (Cloud Computing, Cyber-Sécurité) favorise la performance industrielle d'une PME

66 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables.

Les experts sont globalement favorables à cette affirmation. Cependant, ils signalent le risque de « fog » (brouillard) par la présence et le partage de trop d'informations.

D'autre part, les experts expliquent que certaines entreprises sont « frileuses » à l'idée de laisser leurs données dans le Cloud.

ITEM 19 : L'analyse Big Data est une technologie clef pour l'amélioration de la performance industrielle d'une PME

59 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 24 % d'avis défavorables.

Les experts explicitent que le Big Data peut avoir un intérêt dans certain cas, par exemple pour les « systèmes reconfigurables » ou pour mettre en lumière certain modèle de fonctionnement.

Cependant, le Big Data nécessite de grandes quantités de données qui ne sont pas toujours disponibles dans les PME. Les experts préconisent de parler de Data Mining

dans un premier temps, c-à-d la capacité de l'entreprise à récolter des données. De même, à la place de Big Data, les PME ont besoin de faire du Data Analytics, i.e. de l'analyse de données.

ITEM 22 : Les PME génèrent suffisamment des données pour exploiter les technologies d'analyse du Big Data

50 % d'avis favorables, 24,5 % d'avis mitigés, 17 % d'avis défavorables et 8,5 % ne savent pas répondre.

Les experts considèrent qu'il est nécessaire d'instrumentaliser l'outil de production pour générer les données. Cependant, l'environnement dynamique des PME ne devrait pas être un frein à cette possibilité.

D'autres experts précisent qu'il faut parfois changer le processus pour permettre l'acquisition de données.

Enfin, certaines entreprises présentent des modèles d'affaires plus adaptés au Big Data que d'autres.

ITEM 21 : Les PME ont les compétences pour exploiter les technologies d'exploitation des données (Big Data et Simulation)

50 % des avis mitigés et 50 % des avis défavorables.

Les experts considèrent que les PME manquent de compétences et de ressources financières pour exploiter les technologies d'analyse des données. D'autre part, les experts précisent que les compétences nécessaires à l'analyse des données sont rares et complexes à trouver.

ITEM 13 : L'implantation des technologies favorisant l'amélioration du flux physique CPS (Système cyber-physique), M2M (Machine to machine), robot collaboratif est une clef de la réussite industrielle d'une PME

41,5 % d'avis favorables, 50 % d'avis mitigés et 8,5 % d'avis défavorables.

Les experts considèrent que l'implantation de ces technologies est une clef de la réussite industrielle pour certaines PME, tout dépend des problèmes particuliers de l'entreprise. De plus, pour eux au-delà de ces technologies c'est l'accès aux informations qui constitue une clef de la réussite industrielle d'une PME.

ITEM 18 : L'exploitation de l'ensemble des technologies de l'industrie 4.0 (Big Data, Simulation, l'Internet des objets, les CPS, le Cloud Computing, la réalité virtuelle, la Cyber-Sécurité, les robots collaboratifs et le machine to machine) est nécessaire à l'implantation de l'industrie 4.0

17 % d'avis favorables, 17% d'avis mitigés et 66 % d'avis défavorables.

Les technologies sélectionnées doivent répondre aux besoins identifiés, qui apportent de la valeur et qui permettent d'atteindre les objectifs particuliers de l'entreprise. Ainsi, l'exploitation de l'ensemble des technologies n'est pas nécessaire a priori.

ITEM 20 : Les PME ont les ressources financières pour exploiter les technologies améliorant le flux physique (CPS, M2M, robot collaboratif)

8 % d'avis favorables, 58 % d'avis mitigés, 17 % défavorables et 17 % ne savent pas répondre.

Les experts considèrent que les technologies d'amélioration de flux physique sont les plus coûteuses et les PME n'ont pas les moyens financiers suffisants pour les exploiter.

Cependant, les experts précisent qu'il ne semble pas évident que la réalisation de la connectivité inhérente à l'industrie 4.0 nécessite de lourds investissements.

MATRICE BRUTE

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dans une PME, le manager ayant une forte présence opérationnelle, favorise l'implantation de l'industrie 4.0	2	1	2	3	3	3	3	2	3	2	3	3
La centralisation du pouvoir décisionnel sur le manager de la PME favorise l'implantation de l'industrie 4.0	3	1	3	2	3	3	2	2	1	2	2	1
La vision à courte vue des PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0v	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	2
La formation régulière des employés favorise l'implantation de l'industrie 4.0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Une politique d'amélioration continue interne favorise l'implantation de l'industrie 4.0	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3
L'absence de décomposition fonctionnelle dans une PME est un risque pour l'implantation de l'industrie 4.0	1	1	3	1	2	3	2	1	2	1	1	1
Avoir l'habitude de s'appuyer sur des consultants pour les projets de l'entreprise favorise l'implantation de ...	3	3	3	2	3	3	3	3	1	3	2	2
Le manque de compétences des PME est un facteur de risque important pour l'implantation de l'industrie 4.0	3	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3	2
La communication directe entre le manager et les employés d'une PME favorise l'implantation de l'industrie	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	1
S'appuyer sur des équipes de recherche académique favorise l'implantation de l'industrie 4.0 pour les PME	3	3	3	1	3	3	2	3	3	3	3	1
La proximité entre les collaborateurs d'une PME favorise l'implantation de l'industrie 4.0	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	3	3
Participer activement à un réseau d'entreprise (virtual enterprise) favorise l'implantation de l'industrie	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2
L'implantation des technologies favorisant l'amélioration du flux physique (CPS (Système cyber-physique), ...	2	3	3	2	2	2	2	3	3	2	2	1
L'implantation des technologies supportant les flux d'informations (Cloud Computing, Cyber-Sécurité) favori...	3	3	2	1	3	3	3	3	3	2	2	1
L'exploitation des technologies générant des données (Iot Internet des Objets) est une clef pour la performance industr...	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Les PME qui exploitent leurs données afin de s'améliorer ont moins de risque d'échec lors d'une implantation de l'ind...	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
La simulation est une technologie clef pour l'amélioration de la performance industrielle des PME	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3
L'exploitation de l'ensemble des technologies de l'industrie 4.0 (Big Data, Simulation, l'Internet des objets,...	1	1	3	1	1	2	2	1	1	1	3	1
L'analyse Big data est une technologie clef pour l'amélioration de la performance industrielle d'une PME	2	1	3	3	3	3	3	1	3	1	3	2
Les PME ont les ressources financières pour exploiter les technologies améliorant le flux physique (CPS, M2M, r...	3	3	2	3	3	3	1	1	1	1	2	1
Les PME ont les compétences pour exploiter les technologies d'exploitation des données (Big Data et	3	2	1	3	3	3	1	1	1	1	1	2
Les PME génèrent suffisamment de données pour exploiter les technologies d'analyse du Big Data	3	2	3	3	3	3	1	2	3	1	3	1
La Cyber-Sécurité est sous-considérée par les PME	3	1	3	3	3	3	3	2	3	3	3	1
L'infrastructure IT est un élément clef de la réussite de l'implantation de l'industrie 4.0	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	2	2

Figure 22 : matrice brute, résultats premier questionnaire

Annexe 2 : Synthèse questionnaire N° 2 – Étude Delphi-Régnier

Synthèse

Lors du deuxième tour de l'étude Delphi, les experts se sont exprimés sur un ensemble d'affirmations. Plusieurs idées se dégagent de ce deuxième tour, nous synthétisons ici ces idées. Dans une seconde section, nous présentons en détail, item par item, les opinions d'experts ainsi que la matrice de résultat de ce tour. Nous présentons en conclusion les matrices colorées de l'étude (Figure 23 et Figure 24).

Thème organisationnel

Lors de ce second tour, l'équipe de pilotage avait pris la position de proposer des affirmations fermées. Les 5 questions présentant des affirmations fermées présentent des réponses d'experts mitigées (**item 3, 6, 8, 9 et 10**), cela semble traduire que l'industrie 4.0 présente de nombreuses possibilités et qu'à l'heure actuelle aucune ne semble prévaloir sur les autres.

Les experts s'accordent à dire qu'un projet industrie 4.0 est favorisé par :

- un audit préalable visant à cibler les outils technologiques adaptés aux problèmes de l'entreprise (**item 1**) ;
- une intégration à la vision stratégique de l'entreprise (**item 2**) ;
- un alignement de la ligne hiérarchique (**item 7**) ;
- un dirigeant ne présentant pas d'aversion contre l'industrie 4.0 (**item 8**)
- un environnement innovant et créatif (**item 12**).

Les experts sont mitigés quant au risque que représente la pression du quotidien, parfois forte, dans les PME (**item 4**).

Les experts s'accordent sur le fait que l'industrie 4.0 peut servir à améliorer, la performance opérationnelle (**item 10**) et repenser les modèles d'affaires (**item 9**). De même, les experts expriment que l'industrie 4.0 appliquée aux processus n'est pas nécessairement liée aux stratégies produites et/ou services pouvant être mis en œuvre avec l'industrie 4.0 (**item 3**).

Les experts sont également mitigés sur le profil nécessaire à la conduite d'un projet industrie 4.0 (**item 6**), cependant les commentaires indiquent une liste de compétences nécessaires telles qu'une ouverture d'esprit, une curiosité pour les nouvelles technologies et une connaissance métier.

Les experts s'accordent sur le risque que l'industrie 4.0 soit perçue comme une solution de surveillance des travailleurs (**item 5**). Les experts s'accordent également sur le fait que l'industrie 4.0 est un concept de connectivité plus qu'une boîte à outils (**item 11**), visant à exploiter la donnée ; même si les experts précisent que l'industrie 4.0 concerne également de nouveaux procédés.

Thème technique

Les experts se sont positionnés sur trois thèmes : les technologies exploitées, les compétences nécessaires et les perspectives pour les PME.

Les experts notent qu'a priori, l'ensemble des technologies peuvent être exploitées par les PME (**item 23**). Cependant, parmi les technologies, plusieurs éléments se distinguent.

Concernant les données, les experts notent que les données internes de l'entreprise sont sous exploitées (**item 20**) et que les technologies exploitant ces données sont très efficaces (**item 19**), c-à-d qu'elles permettent d'obtenir de bons résultats à faible coût. Les avis des experts présentent un dissensus fort concernant la question du *Big Data* dans les PME, alors que pour certains les PME peuvent générer beaucoup de données, d'autres affirment qu'en l'état les PME ne génèrent pas assez de données pour parler de *Big Data* (**item 22**).

Concernant les plateformes de service *Cloud Computing* et l'infrastructure interne de l'entreprise, les experts sont mitigés (**item 16**). Les deux solutions sont exploitables par les entreprises et cela dépend de l'utilisation, en cas de besoin d'un

temps de réponse très rapide (inférieur à 100 millisecondes), le *Cloud Computing* présente encore des limitations importantes. Cependant, le *Cloud Computing* peut être mis en place rapidement et à faible coût, favorisant la réactivité de l'entreprise.

Enfin, l'exploitation des KPI (Key Performance Indicators) en temps réel présente un intérêt important (**item 14**). Les experts remarquent que les KPI sont importants pour tout projet d'amélioration, mais que l'aspect « temps réel » ne présente pas nécessairement d'intérêt supplémentaire pour les PME.

Les experts notent que les PME doivent être accompagnées pour choisir au mieux les technologies en lien avec les problématiques rencontrées (**item 15**), ce qui rejoint le besoin d'audit abordé dans la section précédente (**items 1**). De même, les experts notent l'importance des compétences pour accompagner les projets d'industrie 4.0 (**item 13**). Les PME peinent à attirer les profils compétents (**item 24**). Les experts sont mitigés sur le choix entre recrutement et formation interne (**item 21**). Le délai est favorisé par le recrutement (où l'appel à des consultants), mais le transfert de connaissances est favorisé par la formation interne.

Les experts s'accordent sur le fait que l'industrie 4.0 est un vecteur de compétitivité pour les PME (**item 17**), mais sont moins affirmatifs concernant la croissance potentielle que l'industrie 4.0 apporte à ces entreprises (**item 18**).

Commentaires item par item

Les items sont présentés par ordre de consensus positif décroissant (Consensus pour) et sont divisés dans les deux grandes thématiques d'étude : organisation et technologie.

Thématique Organisation

ITEM 1 : Un audit préalable de l'état de l'outil de production favorise la mise en place des outils technologiques de l'industrie 4.0 adaptés aux problèmes de l'entreprise

100 % d'avis favorables.

Les experts considèrent que l'élaboration d'une cartographie de processus permet d'orienter le plan du projet. Ils précisent que l'audit doit être réalisé sur le terrain et non simplement par un questionnaire internet

ITEM 7 : Un alignement de la ligne hiérarchique des opérations (Dirigeants, responsables de productions) est nécessaire à l'exploitation de l'industrie 4.0 dans une PME

92 % d'avis favorables et 8 % d'avis mitigés.

Les experts considèrent qu'un tel alignement est fondamental pour tous les projets menés à l'intérieur de l'entreprise pour combattre la résistance au changement.

Les avis mitigés soulignent qu'il est important qu'aucun maillon de la ligne hiérarchique ne soit réfractaire à l'exploitation de l'industrie 4.0 dans l'entreprise.

ITEM 5 : Il existe un risque que les solutions technologiques de l'industrie 4.0 soient perçues comme des moyens de surveillance des opérateurs

84 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

Les experts ayant donné une opinion favorable considèrent que ce risque provient du manque de transparence et de clarté dans les buts recherchés par l'implantation de l'industrie 4.0. Ils considèrent qu'il est nécessaire d'informer les employés sur les bénéfices et la valeur ajoutée du projet. Ainsi, ils ont constaté qu'au-delà de la surveillance, la peur la plus grande de la part des opérateurs est de perdre leur emploi.

ITEM 2 : Une vision stratégique de l'industrie 4.0 est nécessaire pour l'implanter avec succès dans une PME

75 % d'avis favorables et 25 % d'avis mitigés.

Les experts ont constaté l'importance d'avoir une vision stratégique globale adaptée aux besoins réels de la PME.

Les experts ayant donné une opinion mitigée considèrent qu'il est aussi possible d'implanter l'industrie 4.0 avec une approche itérative ou rapide. Dans ces conditions, il ne serait pas nécessaire d'avoir une vision stratégique.

ITEM 12 : Une PME innovante avec un environnement de travail créatif exploitera plus facilement l'industrie 4.0

75 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

Les experts ayant donné un avis favorable pour cette affirmation ont remarqué que l'innovation et la créativité permettent de développer avec succès une grande quantité de concepts à l'intérieur d'une PME. L'industrie 4.0 présente de nouvelles approches de conception de produits et de processus, ainsi un environnement créatif favorise l'identification de nouvelles possibilités.

ITEM 11 : L'industrie 4.0 doit être vue comme un concept de connectivité (versus boîte à outils technologiques) visant à générer et exploiter les données et les flux d'information

66 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

Les experts ayant donné un avis favorable considèrent que l'industrie 4.0 est l'intégration de la connectivité et des outils technologiques.

Les experts ayant donné une opinion mitigée et non favorable disent que le concept d'industrie 4.0 ne se limite pas à la connectivité. Pour eux, les nouveaux procédés, tels que : les méthodes de résolution de problèmes et la modélisation font aussi partie de cette révolution.

ITEM 4 : La pression opérationnelle de la production est un frein pour l'implantation de l'industrie 4.0

50 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 16 % d'avis défavorables.

Les avis favorables remarquent que la pression opérationnelle au sein des PME provient du manque de planification efficace.

Les avis mitigés et défavorable s'appuient sur le fait qu'avec une bonne planification les contraintes de saisonnalité, indisponibilité des ressources ne devraient pas devenir un frein pour l'implantation.

ITEM 8 : Un dirigeant ayant une appétence pour les outils numériques et technologiques est nécessaire à l'exploitation de l'industrie 4.0

50 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 16 % d'avis en désaccord.

Les experts ayant été favorables pour l'item considèrent que la créativité et l'ouverture d'esprit du dirigeant sont également importantes.

La compréhension des avantages de l'implantation de l'industrie 4.0 et une bonne vision de l'entreprise constituent des éléments plus importants que l'appétence pour les outils numériques pour les opinions mitigées et défavorables.

Les experts notent que ce n'est pas « l'appétence » qui importe, mais que le dirigeant ne soit pas réfractaire à l'industrie 4.0. Le dirigeant sera convaincu si les premiers cas concrets donnent de bons résultats.

ITEM 10 : L'industrie 4.0 doit être avant tout exploitée pour répondre aux problèmes opérationnels des PME

41 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 16 % d'avis défavorables.

Les experts sont mitigés concernant cette affirmation, même les avis favorables sont en vert clair (4 / 5).

Les avis défavorables précisent que l'affirmation « avant tout » est trop forte, l'industrie 4.0 adresse les problèmes opérationnels, mais aussi d'autres problèmes tels que la modification des modèles d'affaires par exemple. De même, l'industrie 4.0 couvre le spectre opérationnel, tactique et stratégique de l'entreprise.

ITEM 6 : Un projet industrie 4.0 nécessite un profil, en tant que chef de projet, spécifique à l'industrie 4.0 (versus formation ingénieur "classique")

34 % d'avis favorables, 41 % d'avis mitigés et 25 % d'avis défavorables.

D'après les experts un ingénieur multidisciplinaire est une clef pour la réussite de ces projets. Un expert précise qu'en Allemagne, le choix d'orienter sur la sélection d'ingénieurs mécaniques que l'on forme à l'informatique ou à l'automatisation pour qu'il acquière les compétences nécessaires à l'exploitation de l'industrie 4.0.

Les experts notent que certaines compétences sont nécessaires à la réussite : la curiosité, l'ouverture d'esprit. Les experts notent qu'il est important de connaître les métiers pour faire le lien entre outils et problématiques industriels. Le niveau d'expérience, les connaissances dans le contexte des PME et la période d'apprentissage sont des critères qui ont motivé les opinions mitigées.

ITEM 9 : L'industrie 4.0 doit être avant tout exploitée pour repenser les modèles d'affaires des PME

33 % d'avis favorables, 25 % d'avis mitigés et 42 % d'avis en désaccord avec la proposition.

Les experts mitigés par l'affirmation considèrent que l'adoption de l'industrie 4.0 n'implique pas forcément de repenser le modèle d'affaires. Les experts précisent qu'il s'agit d'une possibilité offerte par l'industrie 4.0, mais pas nécessairement une voie à privilégier.

ITEM 3 : L'exploitation de l'industrie 4.0 en vue d'améliorer le pilotage industriel des PME est nécessairement liée à la stratégie produit-service de l'industrie 4.0

25 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 16 % d'avis en désaccord avec l'affirmation.

Les experts ayant donné un avis favorable considèrent que la stratégie produit-service doit être claire pour qu'elle ne change pas lors du déploiement de l'industrie 4.0.

Le désaccord exprimé par l'affirmation s'appuie sur le fait que certaines entreprises exploitent l'industrie 4.0 pour améliorer leur processus sans impacter l'offre produit-service.

Thématique Technologie

ITEM 24 : Les technologies de l'industrie 4.0 nécessitent des compétences que les PME peinent à attirer

92 % d'avis favorables.

Les experts ont souligné que ces compétences se retrouvent plus facilement au sein de grands groupes avec des équipes dédiées. Ils ont aussi remarqué que l'accessibilité à la recherche et la mise en place des technologies de l'industrie 4.0 sont limitées pour les PME.

ITEM 17 : L'utilisation de l'industrie 4.0 favorise la compétitivité des PME

83 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

La maîtrise des solutions proposées par l'industrie 4.0 permet aux PME d'améliorer la productivité, l'adaptabilité vis-à-vis des besoins des clients et la capacité du système de production à être configuré.

ITEM 13 : La formation des collaborateurs à l'exploitation des différents groupes technologiques de l'industrie 4.0 est le plus grand défi pour une PME

75 % d'avis favorables et 25 % d'avis mitigés.

L'élaboration d'un plan d'action approprié dans le cadre de la conduite du changement permet de déterminer les besoins en formation et d'orienter la formation aux besoins de l'entreprise.

Les experts ayant donné un avis mitigé considèrent que le plus grand défi est de trouver les ressources compétentes pour implanter les technologies de l'industrie 4.0 dans l'entreprise.

ITEM 14 : La visualisation en temps réel des KPI est une technologie clef pour l'amélioration de la performance industrielle des PME

75 % d'avis favorables, 25 % d'avis mitigés.

Les experts considèrent qu'une sélection correcte de l'ensemble des paramètres à surveiller est une clef de réussite, et cela pour n'importe quel projet. La difficulté la plus importante étant la sélection des KPI.

L'aspect « temps réel » de la visualisation est cependant noté par plusieurs experts comme moins importants que le choix des KPI.

ITEM 19 : Les technologies générant et exploitant les données sont les plus efficaces pour améliorer la performance industrielle des PME

69 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

Les experts favorables à cette affirmation notent que ces technologies sont peu coûteuses et permettent d'identifier les actions permettant des améliorations importantes. En ce sens, elles sont efficaces.

Cependant, l'exploitation de ces données dépend également de l'architecture IT.

ITEM 15 : Une PME doit être accompagnée pour choisir les technologies les plus adaptées à ses besoins

67 % d'avis favorables, 25 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

D'un côté, les experts considèrent que le transfert des connaissances, dans ce domaine, est également important pour les grandes entreprises comme il est pour les PME. D'un autre côté, les avis mitigés ont été motivés par le fait que les consultants ont tendance à privilégier les technologies qu'ils maîtrisent le plus et donc qui ne répondent pas nécessairement aux besoins de l'entreprise. Finalement, les avis défavorables considèrent que des ressources internes peuvent aider dans cet accompagnement.

ITEM 23 : A priori, en fonction des modèles d'affaires des PME, toutes les technologies de l'industrie 4.0 sont exploitables par les PME

67 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 16 % d'avis défavorables.

Les experts ayant donné un avis favorable à cet item considèrent que les ressources (financières, humaines et en temps) des PME sont l'obstacle principal à l'implantation de telles technologies.

Les avis mitigés et défavorables ont été motivés par le fait qu'uniquement les technologies servant à atteindre les objectifs à moyen et long terme seront utiles, selon les besoins particuliers de chaque PME.

ITEM 20 : Orienter les PME vers l'exploitation des données internes disponibles (data analytics) est la première étape vers la transition vers l'industrie 4.0

66 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables.

Les experts ayant donné un avis mitigé considèrent que ça dépend de l'entreprise.

Les experts qui se sont montrés défavorables considèrent que l'intégration de la technologie est la première étape pour générer les données. Par ailleurs, l'analyse de l'ensemble avant le déploiement des technologies est fondamentale.

ITEM 18 : L'exploitation des technologies de l'industrie 4.0 est un vecteur de croissance pour les PME

58 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés.

Les experts ayant donné un avis mitigé considèrent qu'une telle exploitation n'est pas le seul vecteur de croissance. D'autres considèrent que ces technologies permettent initialement de sécuriser l'information puis elles deviennent un facteur de croissance potentielle.

ITEM 22 : Les PME industrielles ne génèrent pas assez de données pour parler de Big Data

42 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 34 % défavorables.

Les experts ayant donné un avis défavorable considèrent qu'il n'existe pas une relation entre la taille de l'entreprise et la quantité de données qu'elle manipule.

Cependant, les avis favorables confirment que les PME ne génèrent pas assez de données en l'état pour parler de big data, d'autre que la réponse dépend de la PME.

ITEM 21 : Pour une PME industrielle, il est préférable de recruter des collaborateurs ayant des connaissances et les compétences liées aux technologies que l'on souhaite exploiter, plutôt que de former en interne les agents

33 % d'avis favorables, 58 % d'avis mitigés et 8 % d'avis défavorables.

D'après les experts la formation en l'interne et le recrutement de collaborateurs ayant les connaissances et les compétences liées à ces technologies sont importantes. Ils ont souligné que les capacités de l'équipe interne motivent ou pas l'appel à des externes.

ITEM 16 : Il est préférable pour les PME de s'appuyer sur des services de Cloud Computing plutôt que de se doter d'une infrastructure IT interne permettant l'exploitation de l'industrie 4.0

25 % d'avis favorables, 50 % d'avis mitigés et 16 % d'avis défavorables.

Les experts considèrent que la taille de l'entreprise et le niveau de sécurité demandé sont des critères permettant de choisir les services de Cloud. Ils ont remarqué que les deux solutions répondent à des besoins différents et il est possible de les déployer en même temps.

MATRICE BRUTE

Un audit préalable de l'état de l'outil de production favorise la mise en place des outils technologiques de l'industrie...	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Une vision stratégique de l'industrie 4.0 est nécessaire pour l'implanter avec succès dans une PME	3	2	3	3	3	2	3	2	3	3	3	3
L'exploitation de l'industrie 4.0 en vue d'améliorer le pilotage industriel des PME est nécessairement liée à la stratég...	3	1	3	3	1	1	2	1	2	2	2	1
La pression opérationnelle de la production est un frein pour l'implantation de l'industrie 4.0	2	3	3	3	2	1	2	3	3	2	1	3
Il existe un risque que les solutions technologiques de l'industrie 4.0 soient perçues comme des moyens de surveillanc...	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3
Un projet industrie 4.0 nécessite un profil, en tant que chef de projet, spécifique à l'industrie 4.0 (versus for...	2	1	3	3	2	2	3	3	3	1	1	2
Un alignement de la ligne hiérarchique des opérations (Dirigeant, responsable de productions) est nécessaire à l'explo...	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
Un dirigeant ayant une appétence pour les outils numériques et technologiques est nécessaire à l'exploitation de l'ind...	2	3	3	3	2	1	3	3	3	2	1	2
L'industrie 4.0 doit être avant tout exploitée pour repenser les modèles d'affaires des PME	3	3	3	3	1	2	1	1	2	1	1	2
L'industrie 4.0 doit être avant tout exploitée pour répondre aux problèmes opérationnels des PME	1	3	3	3	1	2	1	3	3	2	2	2
L'industrie 4.0 doit être vue comme un concept de connectivité (versus boîte à outils technologiques) visant à générer ...	1	3	3	3	1	2	3	3	3	3	3	3
Une PME innovante avec un environnement de travail créatif exploitera plus facilement l'industrie 4.0	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	1	3
La formation des collaborateurs à l'exploitation des différents groupes technologiques de l'industrie 4.0 est le...	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3
La visualisation en temps réel des KPI est une technologie clé pour l'amélioration de la performance industr...	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Une PME doit être accompagnée pour choisir les technologies les plus adaptées à ses besoins	3	3	3	3	2	1	3	3	3	3	2	2
Il est préférable pour les PME de s'appuyer sur des services de Cloud Computing plutôt que de se doter d'une i...	1	2	3	3	3	3	2	3	3	1	1	2
L'utilisation de l'industrie 4.0 favorise la compétitivité des PME	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	1	3
L'exploitation des technologies de l'industrie 4.0 est un vecteur de croissance pour les PME	2	3	2	3	3	3	2	2	3	3	1	3
Les technologies générant et exploitant les données sont les plus efficaces pour améliorer la performance industriel...	2	3	3	3	2	1	3	3	3	3	1	3
Orienter les PME vers l'exploitation des données internes disponibles (data analytics) est la première étape vers la...	3	3	3	3	3	1	3	3	3	2	1	3
Pour une PME industrielle, il est préférable de recruter des collaborateurs ayant des connaissances e...	2	2	3	3	2	3	2	2	3	3	1	3
Les PME industrielles ne génèrent pas assez de données pour parler de Big Data	3	2	3	2	3	3	1	1	3	1	1	1
A priori, en fonction des modèles d'affaires des PME, toutes les technologies de l'industrie 4.0 sont exp...	3	3	3	3	3	3	2	1	2	1	3	3
Les technologies de l'industrie 4.0 nécessitent des compétences que les PME peinent à attirer	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3

Figure 24 : matrice brute, résultats deuxième questionnaire

Annexe 3 : Synthèse questionnaire N° 3 – Étude Delphi-Régnier

Synthèse

Nous synthétisons ici les résultats du troisième tour. Nous précisons par la suite les résultats items par items. Nous présentons en conclusion les matrices colorées de l'étude (Figure 25 et Figure 26)

Ce troisième et dernier tour de consultation confirme la majorité des points soulevés lors des tours précédents. Tout d'abord le rôle clef de la formation des équipes est le facteur de succès le plus important que l'on parle des équipes recherche et développement (**item 7**), des générations « non-native digital » (**item 10**) et de la formation professionnelle (**item 12**).

Les experts notent l'implication à venir sur le plan des métiers existants. Les tâches répétitives et à faible valeur ont de fortes chances de disparaître (**item 4**). Concernant les nouveaux métiers, les experts notent que le risque pour la santé et la sécurité est maîtrisé (**item 2**).

La vitesse de développement des nouvelles technologies présente des risques (**item 1**) par exemple la difficulté de prendre en main une technologie suffisamment vite. Pour cela, les experts notent l'importance des fournisseurs de solution qui doivent adapter leur modèle d'affaires aux spécificités des PME (**item 3**) et simplifier les solutions (**item 5**).

Les experts notent également l'importance d'embarquer les équipes dans les démarches d'amélioration, par exemple sous forme de chantier (**item 11**). Cette motivation peut également naître d'une situation de croissance forte imposant des transformations aux entreprises (**item 5**). La structure des PME ne semble pas être a priori un frein au déploiement de l'industrie 4.0, cependant les experts notent le manque de business case solide pour illustrer cela (**item 9**).

Enfin, les experts notent que l'industrie 4.0 favorise une exploitation plus efficace des ressources et donc une empreinte écologique à performance égale plus faible. Cependant, les experts notent l'importance de l'objectif de l'entreprise : si celle-ci souhaite améliorer sa performance, l'industrie 4.0 ne sera pas nécessairement vectrice de diminution de l'empreinte écologique (**item 8**).

Commentaires item par item

Les items sont présentés par ordre de consensus positif (consensus pour) et sont concentrés autour de la thématique Industrie 4.0 et PME.

Item 4 : L'industrie 4.0 porte le risque de rendre obsolètes certaines fonctions de l'entreprise.

84 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 8% ne savent pas répondre.

Les experts considèrent que des tâches à faible valeur ajoutée et répétitive vont probablement disparaître ou leur volume d'activité va être fortement réduit.

Toutefois, les experts signalent l'importance d'envisager l'industrie 4.0 comme une opportunité pour embarquer les équipes dans les démarches de transformation, ainsi que de former les collaborateurs aux nouvelles tâches émergentes.

Item 5 : La simplicité et l'accessibilité des solutions technologiques proposées aux PME favoriseront l'exploitation de l'industrie 4.0

84 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 8% ne souhaitent pas répondre.

Les experts notent que le manque de compétence en PME sera effectivement compensé par des outils simples et accessibles, tout comme le sont aujourd'hui les téléphones portables, dont la technologie embarquée est complexe, mais l'utilisation simple.

Cependant, la formation interne ne doit pas non plus être négligée pour éviter une trop grande dépendance aux fournisseurs de solution.

Enfin, il est nécessaire que les entreprises prennent la mesure de l'intérêt de ces technologies, par exemple toutes les entreprises ont accès aux gestionnaires de base de données (MS Office par exemple), mais peu d'entreprises les exploitent.

La formation et l'expérience seront des vecteurs qui devront accompagner la simplicité des outils.

Item 7 : Les possibilités offertes par l'industrie 4.0 exigent de revoir la composition des équipes de recherche et développement de produit.

75 % d'avis favorables et 25 % d'avis mitigés.

La difficulté réside dans la multiplication des technologies, en ce sens il est nécessaire d'intégrer de nouvelles connaissances au sein des équipes recherche et développement pour tirer profit de ces opportunités. Pour cela, les experts notent deux vecteurs principaux :

- la formation des équipes en place ;
- l'intégration de nouveaux collaborateurs au sein des équipes existantes.

Les experts ayant un avis mitigé soutiennent que le plus important est de donner aux équipes recherche et développement les moyens de comprendre les implications des nouvelles technologies dans la conception des nouveaux produits.

Item 8 : L'industrie 4.0 présente des opportunités favorisant la diminution de l'empreinte environnementale des PME.

75 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 8% ne savent pas répondre.

L'exploitation de l'industrie 4.0 permet une meilleure utilisation des ressources disponibles et donc une empreinte écologique moindre à performance égale.

Les experts notent également que cela dépend des objectifs de l'entreprise, si l'aspect écologique est important pour une entreprise donnée, l'industrie 4.0 favorisera l'atteinte de cet objectif. Les experts précisent également que l'industrie 4.0 est également exploitée pour améliorer la performance et donc pas nécessairement pour diminuer l'empreinte écologique.

Enfin, les experts notent qu'il manque des *business case* solide pour valider ces éléments.

Item 11 : Une approche de l'implantation de l'industrie 4.0 pourrait être la mise en place de chantier industrie 4.0 (similaire à ce qui se pratique avec les chantiers Lean Manufacturing).

59 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 8% d'avis défavorables, 17 % ne savent pas répondre et 8 % ne souhaitent pas répondre.

L'industrie 4.0 présente une composante technique plus importante que le Lean Manufacturing qui s'appuie sur des éléments plus accessibles (management visuel par exemple). Toutefois, les chantiers favorisent l'implication du personnel à la démarche d'amélioration.

Les technologies de l'industrie 4.0 sont des moyens qui peuvent être exploités dans le cadre de chantier d'amélioration (Lean Manufacturing entre autres possibilités).

La constante reste l'importance de la notion d'expertise pour exploiter ces technologies d'une part, et l'implication des employés d'autre part.

Item 12 : La formation professionnelle (ingénieur et opérateur) n'est pas encore capable de répondre aux besoins de formation grandissants liés à l'industrie 4.0.

58 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 25 % d'avis défavorables.

La formation est nécessaire et un expert précise qu'une étude aux États-Unis montre le manque de disponibilité des formations pour alimenter les besoins des entreprises concernant l'arrivée de ces nouvelles technologies.

Cependant, les experts notent également que dans les PME, il y a peu de temps disponible pour la formation des équipes.

Enfin, les experts notent que la multiplicité et la complexité des technologies concernées ne favorisent pas la capacité des instances en charge de la formation à former des experts techniques maîtrisant toutes les technologies.

Item 1 : L'innovation numérique rapide porte un risque d'obsolescence technologique pour les PME

50 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés, 25 % d'avis en désaccord et 8 % ne savent pas répondre.

Ce risque se présente sous plusieurs aspects :

- la vitesse à laquelle une technologie évolue, rendant parfois complexe un retour sur investissement avant obsolescence ;

- le manque de compétence interne à la PME qui ne permet pas aux entreprises de se doter des technologies suffisamment tôt ;
- l'investissement dans une technologie qui semble « séduisante », mais pas nécessaire vecteur de performance.

Item 9 : La structure organisationnelle des PME présente un risque quant à la pérennité d'un projet industrie 4.0

50 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 25 % d'avis défavorables et 17 % ne savent pas répondre.

La structure verticale d'une PME impose que le dirigeant soit favorable au changement entrepris. Un expert note que lors du suivi d'une PME durant plusieurs années, les dirigeants ont dû être remerciés à cause du blocage concernant des processus d'amélioration et de transformation.

Cependant, les experts notent également que cela peut dépendre de l'entreprise.

Aucun consensus ne se dégage concernant cette affirmation.

Item 10 : L'industrie 4.0 présente un risque plus important quant à l'acceptation par la génération « non-native digitale » que pour la génération de travailleur « natif digital ».

50 % d'avis favorables et 50 % d'avis mitigés.

La moitié des experts notent que les technologies de l'industrie 4.0 peuvent être moins bien perçues et comprises par la génération « non-native digitale ». Cependant, les experts précisent que la formation permet de contrer cette difficulté sans risque.

Item 3 : Le modèle d'affaire des fournisseurs et intégrateurs de solutions « industrie 4.0 » n'est pas adapté aux PME.

33 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés, 25 % d'avis défavorables et 9% ne savent pas répondre.

Les experts notent que peu d'éléments chiffrés permettent d'affirmer ou non cette proposition. Cependant, un expert signale que le coût de démarrage d'un

projet peu être parfois de plusieurs dizaines de milliers d'euros, trop important pour de petites structures.

D'autres experts notent l'importance pour les fournisseurs de proposer des modèles d'affaires qui s'adaptent aux PME, signalant que les besoins de ces entreprises sont différents de ceux des grandes entreprises.

Item 6 : Une croissance rapide est un frein au lancement de projet industrie 4.0 pour une PME.

33 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 59 % d'avis défavorables.

Certains experts notent qu'un état de croissance rapide mobilise souvent les forces vives de l'entreprise, l'implantation de l'industrie 4.0 en parallèle peu alors être complexe.

Cependant, d'autres experts notent également que la pression liée à la croissance favorise la mobilisation des équipes dans le changement et favorise l'accès à de nouveau investissement.

Ainsi, aucun consensus ne se dégage, mais les experts sont majoritairement contre cette affirmation.

Item 2 : L'industrie 4.0 présente un risque pour la santé et la sécurité des employés de production.

8 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 75 % d'avis défavorables.

Les experts rejettent cette affirmation. L'industrie 4.0 favorise une prise de contrôle sur l'environnement par les opérateurs et la réglementation en vigueur protège fortement les employés. Le risque sur la santé et la sécurité est maîtrisé.

MATRICE BRUTE

	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L'innovation numérique rapide porte un risque d'obsolescence technologique pour les PME	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L'industrie 4.0 présente un risque pour la santé et la sécurité des employés de production	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Le modèle d'affaire des fournisseurs et intégrateurs de solutions industrie 4.0 n'est pas adapté aux PME	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L'industrie 4.0 porte le risque de rendre obsolètes certaines fonctions de l'entreprise	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
La simplicité et l'accessibilité des solutions technologiques proposées aux PME favoriseront l'exploitation de l'ind...	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Une croissance rapide est un frein au lancement de projet industrie 4.0 dans une PME	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Les possibilités offertes par l'industrie 4.0 exigent de revoir la composition des équipes de recherche et ...	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L'industrie 4.0 présente des opportunités favorisant la diminution de l'empreinte environnementale des PME	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
La structure organisationnelle des PME présente un risque quant à la pérennité d'un projet industrie 4.0	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
L'industrie 4.0 présente un risque plus important quant à l'acceptation par la génération "non-native digitale" que pou...	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Une approche de l'implantation de l'industrie 4.0 pourrait être la mise en place de chantier industrie 4.0 (simila...	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
La formation professionnelle (ingénieur et opérateur) n'est pas encore capable de répondre aux besoins de formation gra...	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

Figure 26 : matrice brute, résultats troisième questionnaire

Titre : Identification des risques, opportunités et facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 pour la performance industrielle des PME.

Mots clés : PME, Industrie 4.0, Delphi, Abaques de Régnier

Résumé : Acteurs majeurs de l'industrie, les PME (Petites et Moyennes Entreprises) doivent répondre à des exigences toujours plus complexes de leurs clients. L'une des solutions est l'amélioration du pilotage des processus industriels qui comprend la planification et l'exploitation des ressources, le contrôle de la production, la mesure et l'évaluation de la performance. Récemment est né le concept d'industrie 4.0 qui vise au pilotage de la chaîne logistique par la synchronisation en temps réel des flux pour tendre à la fabrication unitaire et personnalisée. Ce concept se base sur l'émergence de nouvelles technologies telles que l'internet des objets et le cloud computing. Notre objectif est d'identifier les risques, les opportunités et les facteurs critiques de succès de l'industrie 4.0 concernant la performance industrielle des PME. Nos premiers travaux montrent que les PME présentent des caractéristiques managériales propres qui peuvent venir à l'encontre des prérequis nécessaires à l'exploitation de l'industrie 4.0. Notre revue de la littérature montre d'une part des disparités dans les cas d'application de l'industrie 4.0 dans les PME, et d'autre part que ces cas sont peu documentés. La difficulté inhérente à l'identification de cas concrets ne nous a pas permis d'organiser une étude statistique de l'application de l'industrie 4.0. Afin de répondre à nos objectifs, nous avons ainsi organisé une étude prospective par consultation d'experts. Cette étude a montré que le manque d'expertise et la stratégie à courte vue sont les risques les plus importants de l'industrie 4.0 dans les PME. L'étude montre également que la formation est le facteur de réussite le plus important, que le dirigeant joue un rôle prépondérant dans la réussite et/ou l'échec d'un projet industrie 4.0 et qu'il est conseillé de se faire accompagner par des experts pour tout projet d'industrie 4.0. Enfin, l'industrie 4.0 est une opportunité exceptionnelle de repenser les processus de production, mais également de proposer de nouveaux modèles d'affaires pour les PME. Les PME présentent des atouts majeurs face à cette révolution industrielle et elles doivent en tirer profit pour ne pas perdre leur avantage concurrentiel vis-à-vis des grandes entreprises.

Title : Identification of risks, opportunities, critical success factors for industry 4.0 to production planning and control of SME

Keywords : SME, Industry 4.0, Delphi, Abaques de Régnier

The SMEs, predominant actors of the industry, have to reach customer expectations that are more and more complex. One of the solutions is to improve the management of the industrial processes which includes production planning and control, performance measurement and evaluation. Lately the concept of industry 4.0 has emerged. This new approach allows the control of production processes by providing real time synchronization of flows and by enabling the production of unitary and customized products. This concept is based on emerging new technologies such as cloud computing and Internet of Things. Our research goal is to identify the industry 4.0 risks, opportunities and critical success factors regarding SMEs industrial performances. Our first work shows that the SMEs have their own specific managerial features that may undermine the adoption of the industry 4.0 concept. Our review of the scientific literature also shows that there are disparities between industry 4.0 business cases in SMEs. These business cases are also poorly documented and provide only few insights for SMEs managers. The inherent difficulty to identify detailed examples prevented us from conducting a statistical study of the industry 4.0 cases within SMEs. In order to reach our research goal, we conducted a prospective study by consulting experts. Our study shows that the major risks facing the adoption of the industry 4.0 concept in SMEs is the lack of expertise and the short-term strategy mindset. The study also shows that training is the most important success factor, that managers have a prominent role in the success and/or the failure of an industry 4.0 project, and that SMEs should be supported by external experts. Lastly, industry 4.0 offers a unique opportunity to redesign SMEs production processes and to adopt new business models. SMEs have decisive advantages toward this industrial revolution that they must use in order to keep their competitive advantages against large company.

