



**HAL**  
open science

# Évaluation de la maturité des processus industriels et système de recommandation pour aider aux choix technologiques et aux étapes de transformation en vue d'améliorer la performance industrielle des entreprises

Neal Widmer

## ► To cite this version:

Neal Widmer. Évaluation de la maturité des processus industriels et système de recommandation pour aider aux choix technologiques et aux étapes de transformation en vue d'améliorer la performance industrielle des entreprises. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0402 . tel-04718721

**HAL Id: tel-04718721**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04718721v1>**

Submitted on 2 Oct 2024

**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.



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES  
UNIVERSITAIRES**

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)  
*(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)*

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR**

DE

**L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE**

Spécialité : GÉNIE DES SYSTÈMES INDUSTRIELS

Par Neal WIDMER

**Évaluation de la maturité des processus industriels et  
système de recommandation pour aider aux choix  
technologiques et aux étapes de transformation en vue  
d'améliorer la performance industrielle des entreprises**

Soutenue le 20 décembre 2023 devant le jury d'examen :

Mme Julie Le Cardinal	Professeure des Universités, Université Paris-Saclay – Ecole CentraleSupélec	Rapporteur
M. Rémy Houssin	Maître de conférences, ICUBE, Université de Strasbourg – Faculté de Physique et d'Ingénierie	Rapporteur
Mme Tatiana Reyes	Professeure des Universités, I2M, Arts et Métiers ParisTech, Institut de Chambéry	Examineur
Mme Hind Bril El Haouzi	Professeure des Universités, ISET-CRAN, Université de Lorraine	Président du jury
M. Davy Monticolo	Professeur des Universités, Université de Lorraine	Directeur de thèse
M. Alaa Hassan	Maître de conférences, Université de Lorraine	Co-directeur de thèse



## Remerciements

Je voudrais d'abord remercier mes directeurs de thèse Davy Monticolo et Alaa Hassan, qui m'ont accompagné durant ce doctorat, et ont su me guider et me donner un cadre pour me permettre d'avancer.

Ensuite, je voudrais remercier Cédric Lebossé et Grégory Ortiz, de l'UIMM Lorraine, qui se sont fortement impliqués sur ce projet et participé grandement, grâce à leur temps, leur énergie et leur expertise, à la construction du résultat final.

Je remercie également Agnès-Marie Lafargue, Déléguée Générale de l'UIMM Lorraine, d'avoir accueilli cette thèse CIFRE au sein de sa structure.

Je tiens également à remercier les équipes de l'UIMM Lorraine, et en particulier Vanessa Chamak, Laure Pastorino, Laetitia Ragno, Marion Rousseau, Virginie de Tugny, Laurence Van Den Brande et Nicolas Velter qui m'ont intégré et m'ont permis de m'épanouir parmi eux.

Merci à Manon Enjolras, Éric Bonjour, Vincent Boly et Laurent Muller, chercheurs de l'ERPI, qui ont accepté de prendre du temps pour répondre à mes questions et enrichir mes réflexions grâce à leur expertise.

Parce que ce sont eux qui font la vie quotidienne du laboratoire et créent une ambiance à la fois adaptée pour travailler mais également très conviviale et agréable, je remercie chaudement les doctorants et post-doctorants de l'ERPI, et en particulier Marie, Marine, Paco, Benjamin, Jose, Fanny, Guillaume, Brice, Halima, Fedoua, Fatimah, Mathilde, Annaëlle, Diana, Corentin et Juliana.

Merci à Amélie Varnier, Anne Mairet, Célia Dugast, Aurélia Gesein, Aurianne Rainot et toutes les équipes administratives de l'ERPI et de l'ENSGSI pour leur aide dans toutes les démarches.

Je remercie tous les membres des entreprises que j'ai eu l'occasion de rencontrer durant cette thèse, qui m'ont accordé du temps et fait profiter de leurs connaissances et expériences pour enrichir ma thèse de leurs précieux retours.

Pour finir, je tiens à remercier ma famille et ma compagne Aline, qui m'ont donné la force de mener ce doctorat à bien malgré les moments de doute et de découragement.

# Table des matières du mémoire

<b>INTRODUCTION</b>	<b>8</b>
<b>I. CONTEXTE GENERAL</b>	<b>8</b>
<b>II. CONTEXTE DE LA THESE</b>	<b>9</b>
A. EQUIPE DE RECHERCHE SUR LES PROCESSUS INNOVATIFS (ERPI)	9
B. UNION DES INDUSTRIES ET METIERS DE LA METALLURGIE (UIMM)	10
<b>III. PROBLEMATIQUES ET QUESTIONS DE RECHERCHE</b>	<b>11</b>
<b>IV. LES CONTRIBUTIONS DE CE TRAVAIL DE THESE</b>	<b>12</b>
A. PREMIERE CONTRIBUTION – MODELE DE MATURITE DE LA CAPACITE A FAIRE EVOLUER SON DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE	13
B. DEUXIEME CONTRIBUTION – MODELE D’EVOLUTION POUR LA TRANSFORMATION DU DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE	13
C. TROISIEME CONTRIBUTION – SYSTEME DE PRECONISATIONS ET DE PRIORISATIONS DES ACTIONS D’EVOLUTION DU DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE	13
<b>V. PLAN DU MEMOIRE</b>	<b>14</b>
<b>ETAT DE L’ART</b>	<b>17</b>
<b>I. INDUSTRIE 4.0</b>	<b>18</b>
<b>II. MODELES DE MATURITE</b>	<b>25</b>
<b>III. DIMENSIONS D’UN MODELE DE MATURITE</b>	<b>26</b>
<b>IV. LES MODELES DE MATURITE EXISTANTS POUR L’INDUSTRIE 4.0</b>	<b>28</b>
<b>CONSTRUCTION DU MODELE DE MATURITE</b>	<b>36</b>
<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>37</b>
<b>II. METHODE DE DEVELOPPEMENT DU MODELE DE MATURITE</b>	<b>37</b>
<b>III. PREMIERE VERSION DU MODELE DE MATURITE</b>	<b>38</b>
<b>IV. CONFRONTATION DU MODELE 2MTI AVEC DES EXPERTS</b>	<b>42</b>
<b>V. CONSTRUCTION DE LA SECONDE VERSION DU MODELE DE MATURITE</b>	<b>44</b>
A. MATURITE DES PROCESSUS	44
B. MATURITE TECHNOLOGIQUE	64
C. CAPACITE A CONDUIRE LE CHANGEMENT	86
<b>VI. CONCLUSION</b>	<b>93</b>
<b>ETABLISSEMENT DE REGLES D’ACCOMPAGNEMENT A L’EVOLUTION TECHNOLOGIQUE : APPLICATION A LA TECHNOLOGIE ERP</b>	<b>95</b>
<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>96</b>
<b>II. CONSTRUCTION DES REGLES DE PREREQUIS</b>	<b>98</b>

<b>III. CONSTRUCTION DES REGLES D'EVOLUTION TECHNOLOGIQUE</b>	<b>101</b>
<b>IV. EXEMPLE D'UTILISATION</b>	<b>108</b>
<b>V. CONCLUSION</b>	<b>113</b>

---

**CONSTRUCTION DU SYSTEME DE PRECONISATIONS POUR L'ETABLISSEMENT DE PRIORITES** **114**

<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>115</b>
<b>II. PRESENCE DE PRATIQUES DE CONCEPTION</b>	<b>115</b>
<b>III. TYPOLOGIES DE PRODUCTION</b>	<b>116</b>
<b>IV. METHODE POUR LE CALCUL D'UN SCORE D'IMPORTANCE DES DIFFERENTS AXES</b>	<b>121</b>
<b>V. ALGORITHME POUR LA PRIORISATION DES DIMENSIONS</b>	<b>123</b>
<b>VI. EXEMPLE D'UTILISATION</b>	<b>126</b>
<b>VII. CONCLUSION</b>	<b>128</b>

---

**EXPERIMENTATIONS VIA DES CAS D'ETUDES** **129**

<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>130</b>
<b>II. PROCESSUS D'ENTRETIEN</b>	<b>130</b>
<b>III. PREMIER CAS D'ETUDES</b>	<b>132</b>
<b>IV. DEUXIEME CAS D'ETUDES</b>	<b>135</b>
<b>V. TROISIEME CAS D'ETUDES</b>	<b>138</b>
<b>VI. RETOURS DES EXPERIMENTATIONS</b>	<b>142</b>
<b>VII. CONCLUSION</b>	<b>144</b>

---

**CONCLUSION** **145**

<b>I. INTRODUCTION</b>	<b>146</b>
<b>II. SYNTHESE DES CONTRIBUTIONS</b>	<b>146</b>
A. MODELE DE MATURETE 2MTI	146
B. REGLES D'ACCOMPAGNEMENT A L'EVOLUTION TECHNOLOGIQUE	147
C. SYSTEME DE PRECONISATIONS POUR LA DETERMINATION DE PRIORITES	147
<b>III. LIMITE DES TRAVAUX ET PERSPECTIVES</b>	<b>147</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>150</b>

---

**ANNEXES** **162**

<b>ANNEXE A : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURETE ET DES RESULTATS DU PREMIER CAS D'ETUDE</b>	<b>163</b>
A. IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE	163
B. MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT	164
C. MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURETE DES PROCESSUS	166
D. MESURE DES NIVEAUX DE MATURETE TECHNOLOGIQUE	172
E. DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER	178
<b>ANNEXE B : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURETE ET DES RESULTATS DU DEUXIEME CAS D'ETUDE</b>	<b>180</b>
A. IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE	180
B. MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT	181
C. MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURETE DES PROCESSUS	183

D.	MESURE DES NIVEAUX DE MATURETE TECHNOLOGIQUE	189
E.	DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER	197
	<b>ANNEXE C : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURETE ET DES RESULTATS DU TROISIEME CAS D'ETUDE</b>	<b>199</b>
A.	IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE	199
B.	MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT	200
C.	MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURETE DES PROCESSUS	202
D.	MESURE DES NIVEAUX DE MATURETE TECHNOLOGIQUE	208
E.	DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER	216

## Sommaire des figures

FIGURE 1. INTERACTIONS ENTRE LES CONTRIBUTIONS DE LA THESE.....	12
FIGURE 2. PLAN DU MEMOIRE.....	16
FIGURE 3. EVOLUTION DES REVOLUTIONS INDUSTRIELLES (KAGERMANN ET AL., 2013).....	19
FIGURE 4. DEMARCHE DE CONSTRUCTION DU MODELE DE MATURETE.....	38
FIGURE 5. LE MODELE DE MATURETE POUR L'INTEGRATION TECHNOLOGIQUE (PREMIERE VERSION), SES HUIT AXES ET SES PRATIQUES.....	40
FIGURE 6. ECHELLES GENERALES DE MATURETE DES AXES POUR LA PREMIERE VERSION DU MODELE DE MATURETE.....	41
FIGURE 7. STRUCTURATION DE L'AXE "LOGISTIQUE" DE LA MATURETE DES PROCESSUS.....	52
FIGURE 8 STRUCTURATION DE L'AXE "CONCEPTION" DE LA MATURETE DES PROCESSUS.....	54
FIGURE 9. STRUCTURATION DE L'AXE "PRODUCTION" DE LA MATURETE DES PROCESSUS.....	57
FIGURE 10. STRUCTURATION DE L'AXE "MAINTENANCE" DE LA MATURETE DES PROCESSUS.....	60
FIGURE 11. STRUCTURATION DE L'AXE "QUALITE" DE LA MATURETE DES PROCESSUS.....	64
FIGURE 12. STRUCTURATION DE L'AXE "LOGISTIQUE" DE LA MATURETE TECHNOLOGIQUE.....	72
FIGURE 13. STRUCTURATION DE L'AXE "CONCEPTION" DE LA MATURETE TECHNOLOGIQUE.....	76
FIGURE 14. STRUCTURATION DE L'AXE "PRODUCTION" DE LA MATURETE TECHNOLOGIQUE.....	80
FIGURE 15. STRUCTURATION DE L'AXE "MAINTENANCE" DE LA MATURETE TECHNOLOGIQUE.....	83
FIGURE 16. STRUCTURATION DE L'AXE "QUALITE" DE LA MATURETE TECHNOLOGIQUE.....	86
FIGURE 17. STRUCTURATION DE L'AXE "IMPLICATION DE LA DIRECTION" DE LA CAPACITE A CONDUIRE LE CHANGEMENT.....	91
FIGURE 18. STRUCTURATION DE L'AXE "METHODOLOGIE DE CONDUITE DU CHANGEMENT" DE LA CAPACITE A CONDUIRE LE CHANGEMENT.....	92
FIGURE 19. DIAGRAMME DE CLASSES DU MODELE DE MATURETE 2MTI PROPOSE.....	94
FIGURE 20. SYSTEME D'ETABLISSEMENT DES ACTIONS D'EVOLUTIONS DU DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE DES ENTREPRISES.....	97
FIGURE 21. NIVEAUX DE MATURETE ACTUELS ET A ATTEINDRE POUR L'ENTREPRISE.....	111
FIGURE 22. CARACTERISATION DES TYPOLOGIES DE PRODUCTION.....	120
FIGURE 23. DEMARCHE SUIVIE POUR LES ENTRETIENS.....	131
FIGURE 24. PROCEDURE SUIVIE POUR LE DEROULEMENT DES ENTRETIENS.....	132
FIGURE 25. NIVEAUX DE MATURETE DU PREMIER CAS D'ETUDE.....	133
FIGURE 26. NIVEAUX DE MATURETE DU DEUXIEME CAS D'ETUDE.....	136
FIGURE 27. PREMIERS RESULTATS DES NIVEAUX DE MATURETE DU TROISIEME CAS D'ETUDE.....	139
FIGURE 28. SECONDS RESULTATS DES NIVEAUX DE MATURETE DU TROISIEME CAS D'ETUDE.....	141

# Sommaire des tableaux

TABLEAU 1. TECHNOLOGIES CLES POUR L'INDUSTRIE 4.0 .....	24
TABLEAU 2. TABLEAU RECAPITULATIF DES MODELES ETUDIES POUR L'ETAT DE L'ART .....	35
TABLEAU 3. ECHELLE GENERALE DE MATURITE POUR LA MATURITE DES PROCESSUS POUR LA PREMIERE VERSION DU MODELE DE MATURITE .....	41
TABLEAU 4. ECHELLE GENERALE DE MATURITE POUR LA MATURITE TECHNOLOGIQUE POUR LA PREMIERE VERSION DU MODELE DE MATURITE .....	42
TABLEAU 5. PROFIL DES EXPERTS INTERROGES LORS DE LA SERIE D'INTERVIEWS.....	43
TABLEAU 6. ECHELLE GENERALE DE MATURITE POUR LA MATURITE DES PROCESSUS .....	47
TABLEAU 7. LITTERATURE ETUDIEE POUR LA CONSTRUCTION DES AXES DE LA DIMENSION "MATURITE DES PROCESSUS".....	48
TABLEAU 8. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE GESTION DU STOCK ET DES REAPPROVISIONNEMENTS .....	50
TABLEAU 9. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE LOGISTIQUE INTERNE ET APPROVISIONNEMENT DE LA PRODUCTION .....	51
TABLEAU 10. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE GESTION DES RELATIONS AVEC LES CLIENTS ET LES FOURNISSEURS.....	51
TABLEAU 11. NIVEAUX DE MATURITE POUR L'AXE DE CONCEPTION .....	54
TABLEAU 12. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE PLANIFICATION DE LA PRODUCTION.....	56
TABLEAU 13. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE PILOTAGE OPERATIONNEL ET CONTROLE DE LA PRODUCTION .....	57
TABLEAU 14. NIVEAUX DE MATURITE POUR L'AXE DE MAINTENANCE .....	59
TABLEAU 15. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES D'IMPLICATION DES EQUIPES ET DU PERSONNEL DANS LE PROCESSUS QUALITE .....	62
TABLEAU 16. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE PRISE EN COMPTE DES EXIGENCES ET DES ATTENTES CLIENTS DANS LE PROCESSUS QUALITE.....	63
TABLEAU 17. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE PILOTAGE OPERATIONNEL DU PROCESSUS QUALITE .....	63
TABLEAU 18. ECHELLE GENERALE DE MATURITE POUR LA MATURITE TECHNOLOGIQUE .....	65
TABLEAU 19. LITTERATURE ETUDIEE POUR LA CONSTRUCTION DES AXES DE LA DIMENSION "MATURITE TECHNOLOGIQUE" .....	66
TABLEAU 20. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DE GUIDAGE DES OPERATEURS LOGISTIQUES .....	70
TABLEAU 21. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE TRANSPORT DES PIECES ET PRODUITS .....	70
TABLEAU 22. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA GESTION DU MAGASIN .....	70
TABLEAU 23. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE SUIVI DES PIECES ET MATERIAUX .....	70
TABLEAU 24. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DE SUIVI ET TRAITEMENT DES DONNEES DE LOGISTIQUE .....	71
TABLEAU 25. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS LOGISTIQUES POUR LA GESTION DES COMMANDES FOURNISSEURS .....	71
TABLEAU 26. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA GESTION DES COMMANDES CLIENTS.....	71
TABLEAU 27. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA REALISATION DE TESTS SUR LES PROTOTYPES	74
TABLEAU 28. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA REPRESENTATION ET MODELISATION DES PIECES ET PRODUITS.....	74
TABLEAU 29. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA CAPACITE DE CONCEPTION COLLECTIVE .....	74
TABLEAU 30. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DEDIEES AU PROTOTYPAGE .....	75
TABLEAU 31. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DE VIRTUALISATION DE PIECES PHYSIQUES .....	75
TABLEAU 32. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'ACQUISITION DES DONNEES UTILISATEURS ....	75
TABLEAU 33. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA PLANIFICATION DE LA PRODUCTION .....	78
TABLEAU 34. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE SUIVI ET LE TRAITEMENT DES DONNEES DE PRODUCTION .....	78
TABLEAU 35. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DE GUIDAGE DES OPERATEURS DE PRODUCTION .....	79
TABLEAU 36. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DES MACHINES DU SYSTEME DE PRODUCTION .....	79
TABLEAU 37. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES D'ASSISTANCE ET DE COLLABORATION TECHNOLOGIQUE .....	80
TABLEAU 38. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES DONNEES POUR LA MAINTENANCE .....	82

TABLEAU 39. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE SUIVI DES OPERATIONS DE MAINTENANCE ...	82
TABLEAU 40. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE GUIDAGE DES OPERATEURS DE MAINTENANCE .....	82
TABLEAU 41. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA FORMATION DES OPERATEURS DE MAINTENANCE .....	83
TABLEAU 42. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA DETECTION DE DEFAUTS DE PRODUCTION....	85
TABLEAU 43. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'IMPORTATION ET LE TRAITEMENT DES DONNEES POUR LE SUIVI DE LA QUALITE .....	85
TABLEAU 44. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LA PROCEDURE DE CONTROLE VISUEL DE LA QUALITE .....	85
TABLEAU 45. ECHELLE GENERALE DE MATURITE POUR LA CAPACITE A CONDUIRE LE CHANGEMENT .....	89
TABLEAU 46. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES D'IMPLICATION DIRECTE DE LA DIRECTION.....	90
TABLEAU 47. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE MISE A DISPOSITION DES RESSOURCES .....	90
TABLEAU 48. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE COMMUNICATION .....	91
TABLEAU 49. NIVEAUX DE MATURITE POUR LES PRATIQUES DE GESTION DE PROJET .....	92
TABLEAU 50. ENSEMBLE DE REGLES DE PREREQUIS POUR L'INTEGRATION DE LA TECHNOLOGIE ERP.....	101
TABLEAU 51. SELECTION D'INDICATEURS DE PERFORMANCE DES ENTREPRISES INDUSTRIELLES.....	105
TABLEAU 52. ENSEMBLE DE PREDICTIONS D'AMELIORATION POUR LA MISE EN PLACE D'UN ERP .....	108
TABLEAU 53. NIVEAUX DE MATURITE MESURES DANS L'ENTREPRISE .....	110
TABLEAU 54. PRATIQUES A AMELIORER POUR L'INTEGRATION D'UN ERP .....	113
TABLEAU 55. PREMIERE VERSION DE LA PRIORITE DES PRATIQUES EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION .....	118
TABLEAU 56. PROFIL DES EXPERTS ET DE LEURS ENTREPRISES POUR LA SERIE D'ENTRETIENS.....	119
TABLEAU 57. DEUXIEME VERSION DES PRIORITES DES PRATIQUES EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION .....	121
TABLEAU 58. POIDS DES AXES EN FONCTIONS DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION .....	122
TABLEAU 59. NIVEAU DE MATURITE DE L'ENTREPRISE EXEMPLE .....	126
TABLEAU 60. CLASSEMENT DES AXES DE L'EXEMPLE ET LEUR SCORE D'IMPORTANCE .....	127
TABLEAU 61. DIMENSIONS A PRIVILEGIER POUR CHAQUE AXE DE L'EXEMPLE .....	128
TABLEAU 62. AXES PRIORITAIRES ET DIMENSIONS A PRIVILEGIER POUR LE PREMIER CAS D'ETUDE.....	134
TABLEAU 63. DETAIL DES NIVEAUX DE MATURITE DES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DES AXES PRIORITAIRES POUR LE PREMIER CAS D'ETUDE .....	135
TABLEAU 64. AXES PRIORITAIRES ET DIMENSIONS A PRIVILEGIER POUR LE DEUXIEME CAS D'ETUDES .....	137
TABLEAU 65. PREMIER CLASSEMENT DES AXES PRIORITAIRES ET DIMENSIONS A PRIVILEGIER POUR LE TROISIEME CAS D'ETUDES.....	140
TABLEAU 66. SECOND CLASSEMENT DES AXES PRIORITAIRES ET DIMENSIONS A PRIVILEGIER POUR LE TROISIEME CAS D'ETUDES.....	142
TABLEAU 67. DETAIL DES NIVEAUX DE MATURITE DES FONCTIONS TECHNOLOGIQUES DES AXES PRIORITAIRES POUR LE TROISIEME CAS D'ETUDE .....	142

## Résumé

Les technologies de l'Industrie 4.0 offrent de nouvelles possibilités pour les entreprises industrielles. L'intégration de ces technologies présentent des challenges importants. Les entreprises rencontrent des difficultés à choisir et intégrer correctement de nouveaux éléments technologiques. De plus, certaines ne sont pas dans des situations propices à ce type de transformation et ont besoin d'accompagnement. Ce travail de recherche, réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE avec l'UIMM Lorraine (Union des Industries et Métiers de la Métallurgie), cherche à répondre à cette problématique : Comment établir la capacité des entreprises industrielles à intégrer de nouvelles technologies et les aider à mettre en place ces transformations technologiques ? Pour commencer, un état de l'art a été mené sur les modèles d'évaluation sur la maturité des entreprises pour l'Industrie 4.0., permettant d'identifier les dimensions pour la construction de notre propre modèle de maturité, à savoir la maturité technologique, la maturité des processus et la capacité de conduite du changement. A partir de ces dimensions, nous avons construit notre propre modèle de maturité, dans lequel chacune de ces dimensions a été associé à des axes et des pratiques. Ce modèle de maturité permet d'évaluer la capacité des entreprises à intégrer des nouvelles technologies. Ensuite, des règles d'évolution technologique ont été déterminées pour prévoir les bénéfices potentiels de différents choix technologiques. Afin d'intégrer les spécificités des entreprises en fonction de leur manière de produire, nous avons construit un système de priorisation des préconisations issues du modèle de maturité. Ces différents éléments constituent un outil pour l'accompagnement à l'évolution des systèmes technologiques des entreprises industrielles. Ce modèle de maturité et cet outil ont ensuite fait l'objet d'expérimentations auprès de trois entreprises industrielles françaises adhérentes à l'UIMM Lorraine. A l'aide de l'outil que nous proposons à l'issue de ce travail de recherche, les industriels peuvent évaluer leur niveau de maturité actuel pour l'intégration de nouvelles technologies, et recevoir des propositions d'actions prioritaires afin de construire leur plan d'action personnalisé.

Mots-clés : Maturité, Choix technologiques, Processus industriels, Modèle de maturité, Industrie 4.0

## **Abstract**

Industry 4.0 technologies open up new possibilities for industrial companies. But integrating these technologies present major challenges. Companies are finding it difficult to select and properly integrate new technological elements. Moreover, some companies are not in a position to embark on this kind of transformation and need support. This research work, carried out as part of a CIFRE agreement with UIMM Lorraine (Union des Industries et Métiers de la Métallurgie), seeks to answer the following question: How can we establish the ability of industrial companies to integrate new technologies, and help them to implement these technological transformations? To begin with, a state of the art was carried out on maturity models for Industry 4.0, enabling us to identify the dimensions for the construction of our own maturity model, namely technological maturity, process maturity and change management capabilities. Based on these dimensions, we have built our maturity model, in which each of these dimensions has been associated with sub-dimensions and practices. This maturity model enables us to assess companies' ability to integrate new technologies. Then, we have determined technological evolution rules to predict potential benefits of different technological choices. In order to take into account the specific features of each company's production processes, we have developed a system for prioritizing the recommendations derived from the maturity model. These different elements constitute a tool for supporting the evolution of enterprises' technological systems. This maturity model and tool were then tested with three French industrial companies belonging to UIMM Lorraine. Using the tool we propose at the end of this research project, manufacturers can assess their current level of maturity for integrating new technologies and receive proposal for priority actions to build their personalized action plan.

Keywords : Maturity, Technological choices, Industrial processes, Maturity model, Industry 4.0

---

# Introduction

---

<b>I. CONTEXTE GENERAL .....</b>	<b>8</b>
<b>II. CONTEXTE DE LA THESE .....</b>	<b>9</b>
<b>A. ÉQUIPE DE RECHERCHE SUR LES PROCESSUS INNOVATIFS (ERPI).....</b>	<b>9</b>
<b>B. UNION DES INDUSTRIES ET METIERS DE LA METALLURGIE (UIMM).....</b>	<b>10</b>
<b>III. PROBLEMATIQUES ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....</b>	<b>11</b>
<b>IV. LES CONTRIBUTIONS DE CE TRAVAIL DE THESE .....</b>	<b>12</b>
<b>A. PREMIERE CONTRIBUTION – MODELE DE MATURITE DE LA CAPACITE A FAIRE EVOLUER SON DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE .....</b>	<b>13</b>
<b>B. DEUXIEME CONTRIBUTION – MODELE D’EVOLUTION POUR LA TRANSFORMATION DU DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE .....</b>	<b>13</b>
<b>C. TROISIEME CONTRIBUTION – SYSTEME DE PRECONISATIONS ET DE PRIORISATIONS DES ACTIONS D’EVOLUTION DU DISPOSITIF TECHNOLOGIQUE.....</b>	<b>13</b>
<b>V. PLAN DU MEMOIRE .....</b>	<b>14</b>

---

## I. Contexte général

Les entreprises industrielles font aujourd'hui face à de nombreux défis et à un environnement de plus en plus compétitif (Kollros, 2021; Morlock et al., 2016). L'adoption de nouvelles technologies au sein des entreprises industrielles représente souvent une question complexe pour celles-ci. D'une part, l'intégration réussie de nouveaux éléments technologiques ouvre de nouvelles possibilités et a des impacts positifs sur la productivité (Stoneman & Kwon, 1994). D'autre part, ce type de projets présente des défis et des contraintes importants, nécessitant des investissements significatifs (Mittal et al., 2018) sans garantie de réussite. La difficulté des choix stratégiques devant être pris par les dirigeants d'entreprise a significativement augmenté ces dernières années, ce qui est partiellement dû à l'accélération des changements de leur environnement technologique (Crestani, 2005). L'importance de ce sujet est aujourd'hui renforcée par l'émergence en 2011 et l'évolution du concept d'Industrie 4.0 (Hofmann & Rüsçh, 2017; Qin J. et al., 2016). En effet, les évolutions que ce dernier apporte ont, d'après certains experts, le potentiel de modifier les processus industriels dans d'importantes proportions (Torbacki & Kijewska, 2019). C'est pourquoi les entreprises industrielles ont un réel besoin d'accompagnement sur leurs projets d'intégration de nouvelles technologies, afin de s'assurer un maximum de chances de succès. La construction d'un outil fournissant des recommandations personnalisées pourrait donc répondre à ce besoin.

L'Union des Industries et Métiers de la Métallurgie (UIMM) est la fédération patronale de l'industrie métallurgique. L'UIMM Lorraine, une de ses chambres syndicales territoriales, a pour objectif d'accompagner les entreprises industrielles adhérentes de la branche métallurgie de Lorraine dans leur développement. Pour cela, elle souhaite concentrer une part de son activité vers de l'accompagnement à l'amélioration de la performance industrielle. Or, il a été démontré que les entreprises mettant en place des technologies de production avancées améliorent leurs capacités concurrentielles et ont de meilleures performances que celles ne le faisant pas (Tracey et al., 1999). En particulier, la numérisation des équipements et processus et les technologies de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de production contribuent à améliorer la performance industrielle (El Zant, 2021). C'est pourquoi l'UIMM Lorraine souhaite se doter de capacités pour soutenir ses entreprises adhérentes sur l'évolution technologique de leurs systèmes de production. Le développement d'un outil générant des recommandations personnalisées pour l'intégration de nouvelles technologies est donc un moyen pertinent de répondre à ce besoin.

---

## II. Contexte de la thèse

La présente thèse a été réalisée avec un contrat CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche), dispositif permettant à une entreprise de recevoir des financements pour le recrutement d'un doctorant pour des travaux de recherche dont les résultats l'intéressent. Elle a été menée au sein de l'Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs de l'Université de Lorraine, et en partenariat avec la SSETI, la Société de Service aux Entreprises Technologiques et Industrielles, société de service de l'UIMM Lorraine.

### a. Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs (ERPI)

L'ERPI est un laboratoire de recherche sur le génie industriel affilié à l'Université de Lorraine et rattaché au pôle scientifique Energie, Mécanique, Procédés, Produits (EMPP) (Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs, 2022). Basée à Nancy, elle est spécialisée sur le domaine de la conduite et du pilotage des processus d'innovation. Or, la transformation technologique des entreprises industrielles est un sujet lié à l'innovation, étant donné les modifications qu'elle entraîne sur les processus de ces entreprises et les manières de travailler des équipes.

Parmi les travaux menés au sein de l'ERPI, différents modèles de maturité et de capacité ont déjà été développés :

- La capacité à innover des entreprises, grâce à l'Indice d'Innovation Potentiel (IIP) (Boly et al., 2014). Cet indice mesure la maturité des processus d'innovation de l'entreprise sur six dimensions, chacune associée à plusieurs pratiques. Ces pratiques sont évaluées sur des grilles de maturité sur cinq niveaux. Pour chaque niveau de chaque pratique, un texte de description explicite ce qu'il signifie, en se basant sur des phénomènes observables pour permettre une évaluation plus objective ;
- La capacité à l'export des Petites et Moyennes Entreprises (PME), avec l'Indice d'Exportation Potentiel (IEP) (Enjolras, 2016). Développé en analogie à l'IIP, cet indice analyse les pratiques liées aux processus d'exportation. Il en recense 25, réunies en huit dimensions.
- La capacité à l'innovation ouverte avec les fournisseurs, grâce à l'Indice de Collaboration et Co-Innovation Potentiel (I2CIP) (Moya Sedan, 2021). Les 18 pratiques de cet indice sont regroupées en cinq dimensions.

---

Le projet de cette thèse est de développer un outil pour l'accompagnement de l'évolution des dispositifs technologiques des entreprises industrielles. Pour accomplir cela, l'objectif est de développer un modèle de maturité comme base de cet outil, mesurant la capacité d'une entreprise à intégrer de nouveaux éléments technologiques. L'ERPI étant, comme vu ci-dessus, à l'origine de différents modèles de maturité ou d'évaluation de la capacité d'organisations à réaliser certains objectifs, est donc bien placée pour fournir l'encadrement scientifique nécessaire au bon déroulement de cette thèse.

## **b. Union des Industries et Métiers de la Métallurgie (UIMM)**

L'UIMM a été constituée le 5 mars 1901, ce qui en fait l'une des plus anciennes confédérations syndicales patronales en France (Fraboulet, 2012). Alors nommée Union des Industries Métallurgiques et Minières (le nom fut modifié en 2001), elle réunit une dizaine de syndicats professionnels nationaux, qui étaient alors beaucoup plus sectoriels, comme celui des constructeurs de matériel de chemin de fer et tramways par exemple. Cette création répond à un besoin d'organiser l'opposition des patrons de la métallurgie au syndicalisme ouvrier en pleine expansion et au gouvernement Waldeck-Rousseau, dont le ministre du Commerce et de l'Industrie est le socialiste Alexandre Millerand. Le rôle de l'organisation est de peser efficacement sur les travaux parlementaires et les décisions gouvernementales afin de défendre les intérêts des dirigeants des industries métallurgiques.

Ce rôle de défense des intérêts de l'industrie est aujourd'hui toujours au cœur de l'action nationale de l'UIMM. Mais, afin de pouvoir également mener des actions à des échelles plus locales et au niveau d'entreprises adhérentes individuelles, elle s'est structurée en 59 chambres territoriales (Union des Industries et Métiers de la Métallurgie, 2022). Les territoires associés à ces chambres correspondent en général à des départements (ex : UIMM du Finistère) ou à des régions telles que définies avant la réforme de redécoupage des régions métropolitaines de 2015 (ex : UIMM Champagne-Ardenne). Une de ces dernières est l'UIMM Lorraine.

L'UIMM Lorraine est chargée de différentes missions, réparties entre ses différents pôles (UIMM Lorraine, 2022). Tout d'abord, il y a le pôle juridique et ressources humaines, qui correspond au métier historique des chambres territoriales de l'UIMM. Son rôle inclut la négociation des conventions collectives territoriales et l'accompagnement des entreprises adhérentes pour l'application des accords de branche, ainsi que du conseil juridique en lien avec le code du travail. Il propose également la certification des compétences des salariés via des dispositifs spécifiques. Un autre service a la charge

---

de la promotion des métiers industriels auprès des jeunes et des demandeurs d'emploi sur le territoire. Un accompagnement est également proposé sur les sujets de sécurité, d'hygiène et de responsabilité sociétale des entreprises, par un pôle dédié. Enfin, un dernier service est chargé de l'accompagnement pour l'amélioration de la performance industrielle des entreprises, ce qui inclue leur évolution technologique. Quatre responsables territoriaux se partagent la région et servent d'interface entre ces services et les entreprises adhérentes, afin de faciliter l'identification des besoins de ces derniers et la mise en contact avec les services adaptés.

La SSETI a été créée en 2012 à l'initiative de l'UIMM Lorraine (Société de Services aux Entreprises Technologiques et Industrielles, 2022). Elle fut créée afin de proposer aux entreprises adhérentes à l'UIMM Lorraine (mais pas seulement) des prestations permettant de prolonger les actions d'accompagnement à des niveaux que ne pourrait proposer la chambre syndicale. Elle structure ses activités en de deux types de prestations : d'un côté, proposer différentes formations réunies autour de trois thématiques (droit social et ressources humaines ; hygiène, sécurité et environnement ; performance industrielle et innovation) ; de l'autre, fournir des interventions pour un accompagnement personnalisé sur différentes thématiques, comme les ressources humaines ou la performance industrielle. Pour compléter leur offre sur cette thématique de la performance industrielle, la SSETI a souhaité se doter d'un outil de diagnostic et de recommandation pour le développement technologique des entreprises industrielles. C'est pourquoi elle a décidé de financer cette thèse CIFRE.

### **III. Problématiques et questions de recherche**

Pour pouvoir mettre en place cet accompagnement, il est nécessaire d'analyser le fonctionnement des entreprises et d'identifier si elles sont prêtes à mener avec succès des projets de transformation technologique. Cette problématique opérationnelle s'est traduite dans le travail de recherche de cette thèse à travers cette question de recherche :

<p><b>Comment mesurer la capacité d'une entreprise à acquérir et intégrer correctement de nouveaux éléments technologiques ?</b></p>
--

La réponse à cette question devra assimiler les différentes dimensions utiles à l'amélioration de la performance des entreprises et leur permettre de construire leur propre « Feuille de route

technologique ». En effet, cette approche vise à pouvoir faire face et traiter une très grande diversité de situations, que ce soit en termes de taille, de métiers, de processus ou de maîtrise technologique. Dans le cadre de cette thèse, notre proposition est principalement destinée à soutenir les petites entreprises. En effet, celles-ci rencontrent des difficultés plus importantes que les grands groupes dans leur développement technologique. Elles ont souvent plus de limitations en termes de moyens financiers, mais aussi généralement plus de difficultés, à cause de moindres ressources en connaissances ou de sensibilisation aux technologies existantes, à identifier comment progresser que les grands groupes, qui disposent habituellement de départements de stratégie (Masood & Sonntag, 2020; Mittal et al., 2018). Cela nous conduit à la deuxième question de recherche de ce travail :

**Comment évaluer l'impact des changements de maturité technologique de l'entreprise sur l'atteinte de ses objectifs ?**

La réponse à cette question permettra de tirer les enseignements nécessaires pour transformer les résultats du diagnostic donné par le modèle en recommandations pratiques.

#### IV. Les contributions de ce travail de thèse

Pour répondre à ces deux questions, différentes contributions ont été développées durant l'avancement de cette thèse (Figure 1)

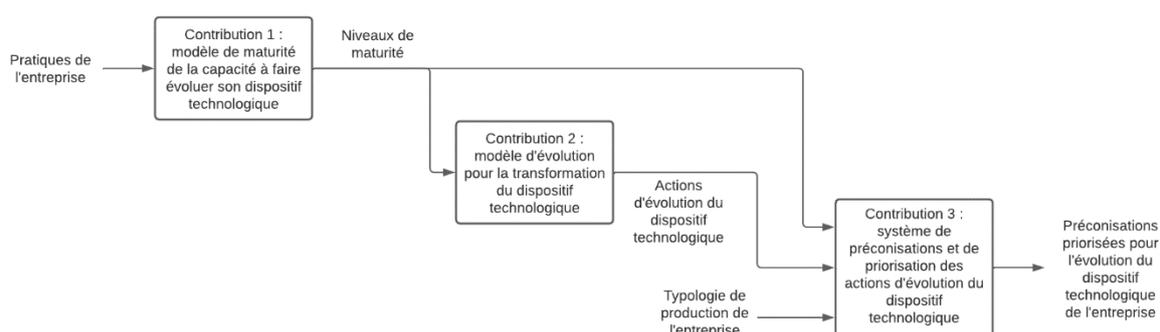


Figure 1. Interactions entre les contributions de la thèse

---

### **a. Première contribution – Modèle de maturité de la capacité à faire évoluer son dispositif technologique**

Le premier apport de cette thèse est de proposer une solution d'accompagnement pour les processus d'acquisition de nouvelles technologies des entreprises. Pour cela, nous avons décidé de construire un modèle de maturité sur lequel baser un outil d'audit et de recommandations. En effet, un modèle de maturité nous semble utile car il s'agit d'un format adapté pour analyser les entreprises et leur fonctionnement actuel ainsi que pour proposer des pistes de développement et d'amélioration de leurs pratiques (Lizarralde Dorransoro et al., 2020). Le modèle que nous présentons est basé sur trois dimensions nous semblant important à prendre en compte pour le succès des projets de transformation technologique des entreprises : la maturité des technologies au sein de l'entreprise, la maturité des processus en place dans l'organisation et la capacité de cette dernière à conduire le changement.

### **b. Deuxième contribution – Modèle d'évolution pour la transformation du dispositif technologique**

Afin de pouvoir utiliser les résultats des entreprises dans le modèle de maturité, il était nécessaire de développer un moyen de les exploiter pour générer des recommandations à lui transmettre. La deuxième contribution de cette thèse est donc un ensemble de règles à appliquer lors du traitement des résultats du modèle de maturité afin de pouvoir construire différents conseils sur le choix des technologies à intégrer et la manière de mener le processus de transformation technologique. Ces règles sont de deux types : des règles de prérequis à atteindre avant de pouvoir s'intéresser à l'acquisition de certains éléments ; des règles prédictives sur les impacts potentiels attendus lors de la transformation technologique permettant d'évaluer les effets et ainsi aider l'entreprise à avancer vers l'atteinte de ses objectifs.

### **c. Troisième contribution – Système de préconisations et de priorisations des actions d'évolution du dispositif technologique**

Pour que les résultats obtenus à la suite du traitement des réponses du modèle de maturité puissent réellement être exploités, il sera inévitable que l'entreprise fasse des choix parmi les différentes

---

préconisations transmises. Pour ce faire, la troisième contribution de ce travail de thèse est constituée d'un système de priorisation des recommandations, en fonction des niveaux de maturité de l'entreprise, mais également du modèle de production suivi par l'entreprise. Ce dernier point est important pour mieux prendre en compte les spécificités des typologies de production et ainsi fournir les résultats les plus pertinents et utiles possibles.

## V. Plan du mémoire

Ce mémoire est structuré en 5 chapitres (Figure 2). Ces différentes parties permettent, pour commencer, d'appréhender le contexte scientifique dans lequel cette thèse s'inscrit, puis d'étudier les différentes contributions développées pour répondre aux problématiques identifiées précédemment.

- **Chapitre 1 : Etat de l'art.** Dans ce chapitre, nous présentons la notion d'Industrie 4.0 et ses enjeux. Nous étudions également différents modèles de maturité de l'Industrie 4.0 existants dans la littérature, leurs caractéristiques et leurs limites.

Dans la suite du mémoire sont présentées les trois contributions développées lors de ce travail de recherche. L'objectif global est le développement d'un outil d'audit et de préconisations pour l'accompagnement des entreprises industrielles dans l'évolution de leurs dispositifs technologiques.

- **Chapitre 2 : Construction du modèle de maturité.** Dans ce chapitre, nous présentons un modèle de maturité pour mesurer la capacité d'une entreprise à faire évoluer son dispositif technologique. Ce modèle est basé sur les trois dimensions à prendre en compte pour la bonne intégration de nouvelles technologies identifiées précédemment, à savoir : la maturité des processus de l'entreprise, le facteur humain du changement et la maturité technologique de l'entreprise. Ce chapitre présente également la démarche suivie pour le développement de ce modèle.
- **Chapitre 3 : Etablissement de règles d'accompagnement à l'évolution technologique.** Dans ce chapitre, nous présentons un modèle d'évolution pour la transformation du dispositif technologique basé sur le modèle de maturité développé dans le chapitre précédent. Ce modèle se base sur des règles déduites de plusieurs scénarios d'évolution technologique et de leurs impacts.

- **Chapitre 4 : Construction du système de préconisations basé sur le modèle de maturité.** Dans ce chapitre, nous présentons un système se basant sur la typologie de production des entreprises, les niveaux de maturité mesurés ainsi que les règles d'accompagnement à l'évolution technologique pour générer des préconisations à destination des entreprises auditées. Ce système intègre également des règles de priorisations pour ordonner l'importance des préconisations et ainsi aider les entreprises à prendre les décisions pertinentes et construire leur feuille de route.
- **Chapitre 5 : Expérimentations via des cas d'études.** Dans ce chapitre, nous présentons les cas d'études mis en place pour évaluer notre modèle de maturité et les méthodes développées pour en exploiter les résultats et proposer des préconisations aux entreprises industrielles. Après avoir détaillé la démarche suivie pour réaliser ces cas d'études, nous décrivons chaque entreprise ayant pris part à cette phase expérimentale et les résultats. Puis nous présentons les retours fournis par les entreprises. Enfin, nous détaillons les conclusions tirées de ces cas d'études.

Le mémoire se termine par une conclusion générale pour synthétiser le travail de recherche et ses limites, ainsi que des perspectives de recherche.

- **Conclusion générale et perspectives :** Cette partie rappelle les contributions développées pour répondre aux problématiques identifiées, autour de l'accompagnement à l'évolution technologique des entreprises industrielles. Il souligne également les limites de ce travail et propose des perspectives de recherche pouvant prendre la suite de cette thèse.

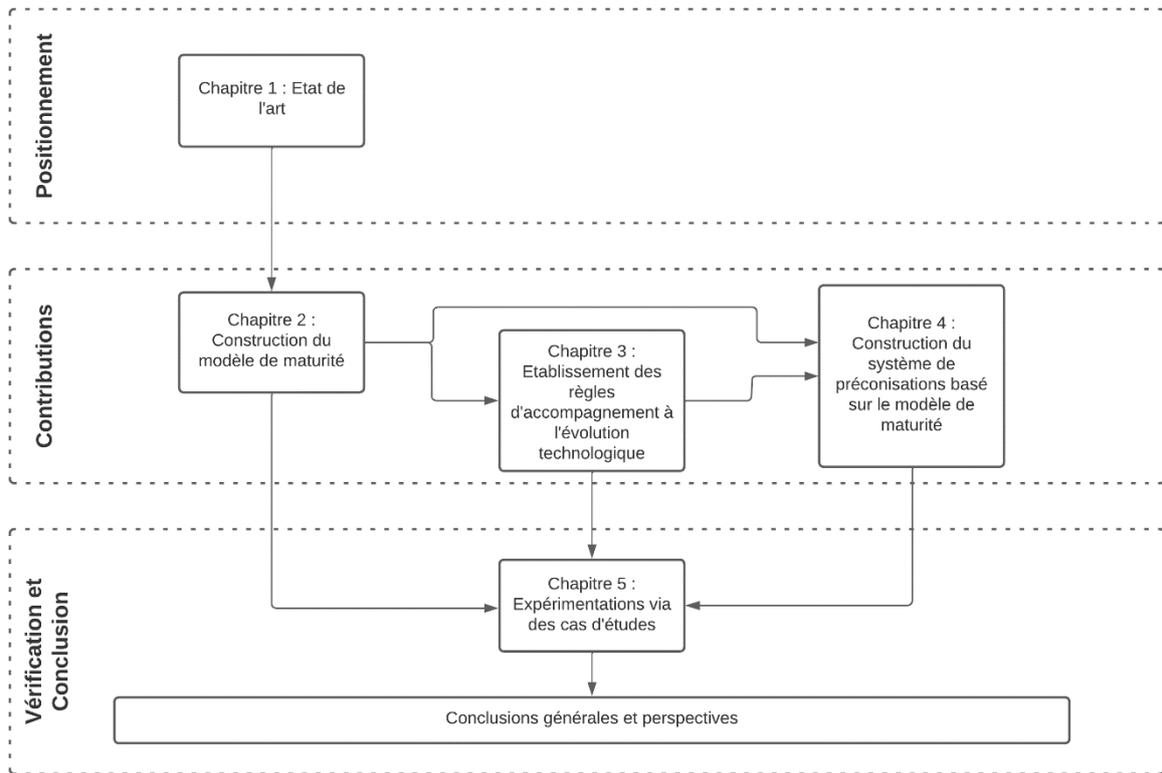


Figure 2. Plan du mémoire

# Chapitre 1

---

## Etat de l'art

---

<b><u>I. INDUSTRIE 4.0 .....</u></b>	<b><u>18</u></b>
<b><u>II. MODELES DE MATURETE .....</u></b>	<b><u>25</u></b>
<b><u>III. DIMENSIONS D'UN MODELE DE MATURETE .....</u></b>	<b><u>26</u></b>
<b><u>IV. LES MODELES DE MATURETE EXISTANTS POUR L'INDUSTRIE 4.0.....</u></b>	<b><u>28</u></b>

---

## I. Industrie 4.0

Le concept d'Industrie 4.0 est apparu pour la première fois dans un document publié par la *Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft* (« Union de l'économie et de la science pour la recherche »), une commission de vingt-cinq experts issus du monde de la recherche et des entreprises, chargée de la définition et du pilotage de la stratégie nationale allemande sur l'innovation et la Recherche et Développement (R&D) (Drath & Horch, 2014; Kollros, 2021; Rother, 2020; Žižek et al., 2020). Comme précisé par Hofmann, Rüsç ou encore Qin et al., il désigne un ensemble de nouvelles technologies manufacturières offrant de nouvelles possibilités aux entreprises industrielles (Hofmann & Rüsç, 2017; Qin J. et al., 2016). Parmi ces technologies, on peut retrouver l'interconnectivité des machines, l'automatisation de la production ou la fabrication additive par exemple.

Le terme « Industrie 4.0 » a été créé dans l'idée que le développement de ces nouvelles technologies entraîne les entreprises industrielles dans une révolution industrielle, qui serait alors la quatrième. Le terme de « Révolution Industrielle » fut utilisé pour la première fois par Arnold Toynbee, historien de l'économie anglais, pour décrire la croissance économique de la Grande Bretagne entre 1760 et 1840 (Poór et al., 2020). Il est défini comme « le changement relativement soudain et violent qui donne naissance à la société industrialisée » (Coleman, 1956). Chacune de ces révolutions fut caractérisée à une rupture technologique dans les moyens de production, l'exploitation de nouvelles sources d'énergies ou de nouvelles méthodes d'organisation, offrant de nouvelles possibilités aux entreprises et des hausses importantes de productivité (Ang et al., 2016; Kagermann, 2015; Vinardi, 2019). La complexité de ces systèmes de production a également fortement grandi à chacune de ces évolutions (Figure 3).

La première révolution industrielle démarra vers la fin du XVIIIe siècle en Angleterre. Elle reposait sur le développement de l'exploitation du charbon et de la technologie de la machine à vapeur, comme celle de James Watt. Ces évolutions ont permis la mise en place de la mécanisation par l'eau et la vapeur. Ainsi, les entreprises ont pu passer d'une production manuelle à une production par des machines, réduisant la variabilité des produits (Kollros, 2021).

Elle fut suivie par une deuxième révolution industrielle à la fin du XIXe siècle. Cette dernière fut basée sur le développement de l'énergie électrique et de méthodes de rationalisation des tâches comme le Taylorisme, entraînant la mise en place de chaînes de montage. Cette deuxième révolution industrielle est celle de la standardisation des produits et de la production de masse.

La troisième révolution industrielle eut lieu dans les années 1970. Exploitant les possibilités offertes par le développement de l'électronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), elle est basée sur l'automatisation des moyens de production. Suite à cette révolution, la demande des consommateurs a évolué, demandant des produits plus variés mais en conservant les niveaux de qualité atteints suite à la standardisation. On a alors parlé de *mass customization*, qui a forcé les industriels à gérer à la fois les dimensions de productivité, de réduction des coûts mais aussi de flexibilité.

La 4<sup>e</sup> révolution industrielle est considérée par certains chercheurs, comme Chen ou Dalenogare et al. par exemple, comme héritière des trois précédentes (Y. Chen, 2017; Dalenogare et al., 2018). Mais, d'après (Drath & Horch, 2014; Žižek et al., 2020), cette quatrième révolution industrielle est différente, car est la première à être annoncée avant sa mise en place effective, contrairement aux trois premières qui ne furent identifiées et commentées qu'à posteriori. Elle se base sur les systèmes cyber-physiques, Internet, l'interconnexion des technologies de production et les systèmes avancés de traitement des données pour offrir de nouvelles possibilités.

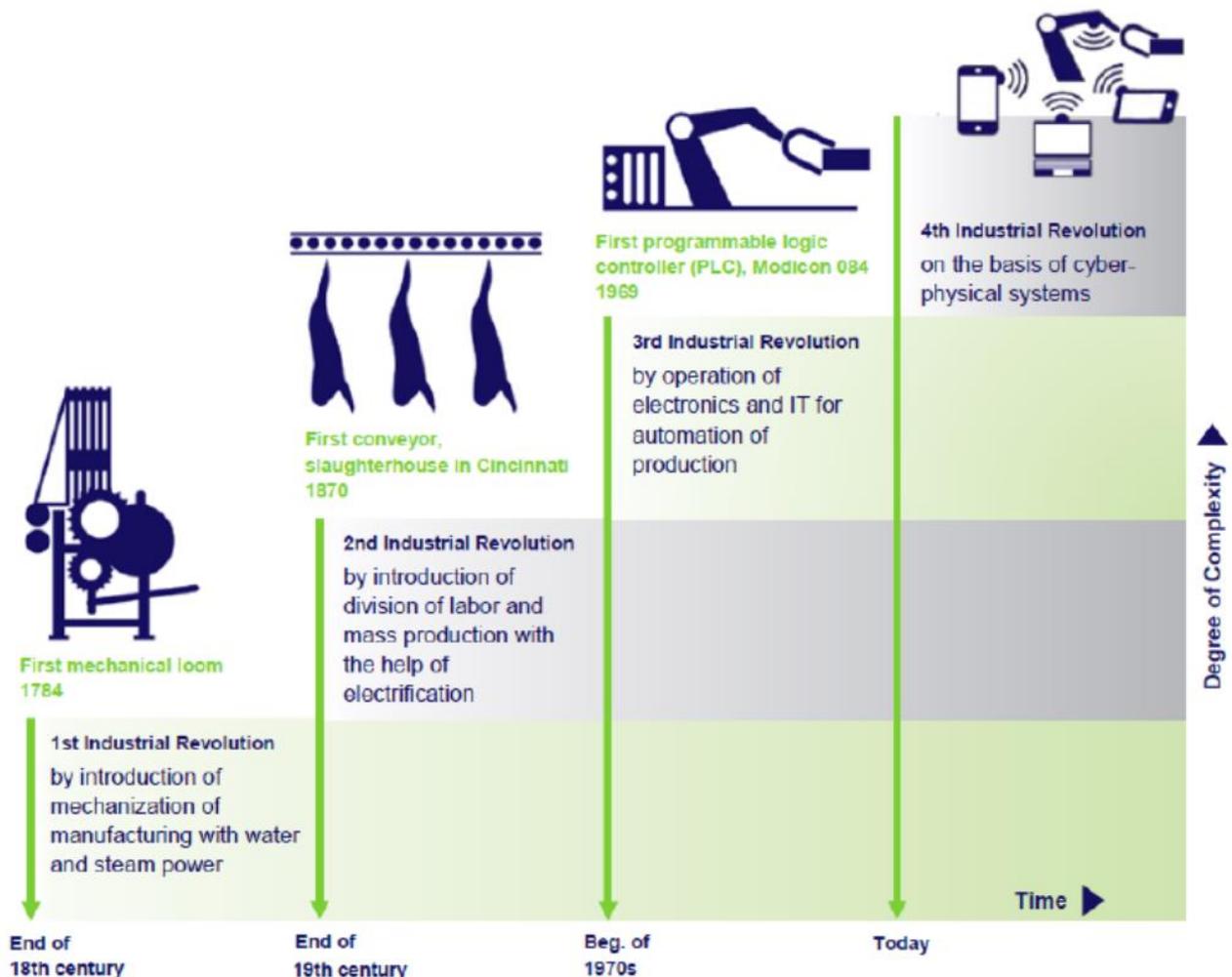


Figure 3. Evolution des révolutions industrielles (Kagermann et al., 2013)

---

Plusieurs publications soulignent le fait que, la notion d'Industrie 4.0 étant récent, elle n'est pas encore figée et ne fait pas encore l'objet d'une définition faisant consensus (Torbacki & Kijewska, 2019). Ce concept peut parfois être désigné par d'autres termes, même si ces derniers comportent parfois quelques nuances. Ces autres appellations incluent : *Smart Production, Smart Manufacturing, Industrial Internet, Smart Factory, Intelligent Manufacturing, Advanced Manufacturing, Factory of the Future, Industry of the Future, Smart Industry, High Value Manufacturing, Manufacturing 4.0, Integrated Industry, Digital Factory, Manufacturing Renaissance, ...* (Rother, 2020; Vinardi, 2019).

Dans leur article de 2019, Obiso et al. ont listé les principes fondamentaux pour la mise en place et le fonctionnement de de l'Industrie 4.0 (Obiso et al., 2019):

- L'interopérabilité et l'intégration, c'est-à-dire que les différents éléments du système de production doivent être capables de communiquer et de fonctionner ensemble pour la réalisation de la production ;
- La décentralisation et l'autonomie, c'est-à-dire que les éléments du système soient capables dans certaines circonstances de prendre des décisions et de réaliser des tâches sans que des interventions extérieures soient nécessaires ;
- La virtualisation et la transparence des données, c'est-à-dire que tous ou presque tous les éléments du système de production et des tâches support ont une copie numérique grâce aux systèmes cyber-physiques et aux capteurs, permettant la consultation et le suivi des données ;
- Des capacités en temps réel, principalement en termes de collecte et de traitement des données, indispensable pour obtenir la meilleure réactivité possible ou la mise en place de prise de décision décentralisée ;
- La modularité, c'est-à-dire la capacité de pouvoir modifier facilement l'agencement des éléments technologiques du système de production, y compris l'ajout ou le retrait de nouvelles machines ;
- L'assistance technique et l'orientation service, permises grâce à Internet, et permettant une plus grande flexibilité dans les relations entre les entreprises partenaires.

Cette révolution industrielle est basée sur plusieurs nouvelles technologies, principalement issues du développement des technologies numériques, de l'information et de la communication. Différents auteurs ont proposé des listes de technologies clés pour la mise en place de l'Industrie 4.0.

---

Hermann et al. ont proposé une liste de quatre briques technologiques : les systèmes cyber-physiques (*Cyber-Physical Systems*, CPS), l'Internet des Objets (*Internet of Objects*, IoT), l'Internet des services (*Internet of Services*, IoS) et les usines intelligentes, qui implique des robots industriels et de l'intelligence artificielle (Hermann et al., 2015).

Fatorachian and Kazemi relèvent également les CPS et l'IoT parmi les technologies habilitantes de l'Industrie 4.0, qui incluent également : l'Internet Industriel, les réseaux d'informations, les systèmes logiciels, le *cloud computing*, les *Big Data* (Fatorachian & Kazemi, 2018).

En 2017, Ang et al. proposèrent un ensemble de technologies permettant la réalisation de l'Industrie 4.0 : les robots intelligents, les simulations automatisées, l'IoT, le *cloud computing*, la fabrication additive, la réalité augmentée et les *Big Data* (Ang et al., 2017).

Un ensemble plus large de technologies considérées comme les fondations de l'Industrie 4.0 fut publiée par Rüßmann et al. en 2015. Ces technologies sont : les robots autonomes, les simulations informatiques, l'intégration horizontale et verticale des systèmes, l'Internet Industriel des Objets (*Industrial Internet of Objects*, IIoT), la cybersécurité, le *Cloud Computing*, la fabrication additive, la réalité augmentée et les *Big Data* (Rüßmann et al., 2015; Žižek et al., 2020).

Une liste de technologies de l'Industrie 4.0 fut proposée en 2018 par Dalenogare et al. : la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) ; les systèmes d'ingénierie intégrés ; l'automatisation numérique de la production grâce à l'utilisation de capteurs ; des lignes de production souples; des systèmes d'exécution de la fabrication (*Manufacturing Execution System*, MES) et le contrôle de supervision et d'acquisition de données (*Supervisory Control And Data Acquisition*, SCADA) ; les simulation numériques et l'analyse de modèles virtuels ; les *Big Data* ; les systèmes numériques de produits-services conjoints ; la fabrication additive ; les services *clouds* pour les produits (Dalenogare et al., 2018).

Pour Obiso et al., les technologies clés de l'Industrie 4.0 sont : l'IoT ; les CPS ; la cybersécurité ; le *Cloud computing* ; les *Big data* et le traitement des données ; les robots autonomes ; les logiciels de simulations ; les machines de fabrication additive ; la réalité augmentée ou les logiciels de visualisation 3d (Obiso et al., 2019).

Dans sa thèse, Rebecca Castagnoli considère que les technologies permettant la mise en place de l'Industrie 4.0 sont les technologies avancées de fabrication, la réalité augmentée, l'IoT, les *Big Data* et la capacité d'analyse des données, le *cloud computing*, la cyber-sécurité, la fabrication additive, les simulations numériques et l'intégration horizontale et verticale des systèmes (Castagnoli, 2021). Elle admet que d'autres technologies peuvent être considérées en fonction des secteurs des entreprises.

Dans leur article de 2017, Danjou et al. proposent dix groupes de technologies comme briques constituanes de l'Industrie 4.0 : les *Big Data*, l'Intelligence Artificielle (IA), le *cloud computing*, l'IoT, les CPS, la cybersécurité, les robots et machines autonomes, les systèmes de communication inter-machines, les logiciels de simulation numériques, et la réalité augmentée (Danjou et al., 2017).

Pour Zheng et al., la liste des technologies permettant le déploiement de l'Industrie 4.0 : les CPS ; l'IoT ; les *Big Data* et l'analyse de leurs données ; le *cloud computing* ; l'IA ; la *blockchain* ; les logiciels de simulation et de modélisation numériques ; les technologies de visualisation comme la réalité virtuelle ou la réalité augmentée ; les technologies d'automatisation et les robots industriels ; la fabrication additive (Zheng et al., 2021).

Le tableau 1 liste les principales technologies clés pour l'Industrie 4.0, celles qui sont les plus relevées dans la littérature.

Technologies	Définition	Références
<i>Big Data</i> et analyse des données	Collecte et analyse d'une grande quantité de données disponibles à l'aide d'une série de techniques spécifiques permettant de filtrer, de saisir et de rapporter des perspectives, où les ensembles de données trop volumineux ou trop complexes pour être analysés à l'aide de procédures ou de méthodes de traitement de données conventionnelles (Lichtblau et al., 2018; Zheng et al., 2021)	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Dalenogare et al., 2018; Danjou et al., 2017; Fatorachian & Kazemi, 2018; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
<i>Cloud</i>	Système pour la fourniture de services de stockage en ligne pour toutes les applications, programmes et données dans un serveur virtuel, sans nécessiter d'installation (Zheng et al., 2021)	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Dalenogare et al., 2018; Danjou et al., 2017; Fatorachian & Kazemi, 2018; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
Internet des Objets	Réseau d'informations d'objets physiques permettant la collecte et l'échange de données et donnant des	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Danjou et al., 2017; Fatorachian & Kazemi, 2018;

	possibilités d'interaction et de coopération de ces objets (Zheng et al., 2021)	Hermann et al., 2015; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
Automatisation et robots industriels	Machines et équipements qui automatisent les processus opérationnels, comprenant la robotique collaborative, permettant aux humains et aux machines de fonctionner dans un environnement d'apprentissage partagé (Zheng et al., 2021)	(Ang et al., 2017; Dalenogare et al., 2018; Danjou et al., 2017; Hermann et al., 2015; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
Logiciels de simulation et de modélisation	Technologies qui reflètent les données des éléments du monde physique telles que les machines, les produits, les humains, dans un monde virtuel, en visant la simplification et l'accessibilité pour la conception, la création, les essais et les opérations réelles des systèmes (Zheng et al., 2021)	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Dalenogare et al., 2018; Danjou et al., 2017; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
Fabrication additive	Groupe de processus produisant des objets par l'addition de matière plutôt que par le retrait à partir d'un bloc solide (Ang et al., 2016)	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Dalenogare et al., 2018; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)
Technologies de visualisation (réalités augmentée et virtuelle)	La réalité virtuelle est une application de la technologie informatique pour créer un monde interactif, permettant à l'utilisateur de contrôler les objets virtuels et l'ensemble de la scène virtuelle en temps réel (Zheng et al., 2021)  La réalité augmentée est un ensemble de techniques innovantes d'interaction homme-machine qui permettent	(Ang et al., 2017; Castagnoli, 2021; Danjou et al., 2017; Obiso et al., 2019; Rüßmann et al., 2015; Zheng et al., 2021; Žižek et al., 2020)

	d'intégrer des objets virtuels pour coexister et interagir dans l'environnement réel (Zheng et al., 2021)	
Systemes Cyber-Physiques	Les systemes cyber-physiques relient les mondes physique et virtuel en communiquant par le biais d'une infrastructure des donnees constituant le cadre permettant de generer un modele virtuel de la production reelle, d'analyser tous les flux de donnees issus des capteurs et autres systemes informatiques et de cartographier leurs interrelations (Lichtblau et al., 2018)	(Danjou et al., 2017; Fatorachian & Kazemi, 2018; Hermann et al., 2015; Obiso et al., 2019; Zheng et al., 2021)
Intelligence Artificielle	Systemes qui pensent de maniere humaine et rationnelle selon six disciplines principales, dont le traitement du langage naturel, la representation des connaissances, le raisonnement automatique, l'apprentissage automatique, la vision par ordinateur et la robotique (Zheng et al., 2021)	(Danjou et al., 2017; Hermann et al., 2015; Zheng et al., 2021)

Tableau 1. Technologies clés pour l'Industrie 4.0

A travers la mise en place de ces différentes technologies, les entreprises visent plusieurs bénéfices. Le principal résultat attendu lors de la mise en place de l'Industrie 4.0 est d'atteindre une production plus efficace, plus ajustée, plus individualisée (Žižek et al., 2020). De manière plus détaillée, les avantages principaux de l'Industrie 4.0 sont, d'après (Fatorachian & Kazemi, 2018) :

- Capacité de réponse aux demandes des clients individuels ;
- Ingénierie et fabrication flexibles et agiles ;
- Amélioration du partage des informations et de la prise de décisions ;
- Amélioration de l'intégration et de la collaboration ;
- Amélioration de la productivité des ressources ;
- Personnalisation de masse.

## II. Modèles de maturité

L'évaluation de la maturité des entreprises industrielles constitue un point de départ important pour le déploiement des technologies de l'Industrie 4.0 au sein de ces organisations (Wagire et al., 2021). On peut définir ainsi la notion de maturité :

**Définition** : La maturité peut être considérée comme la mesure dans laquelle un processus spécifique est explicitement défini, géré mesuré, contrôlé et efficace (Paulk et al., 1993).

Une fois la maturité définie sur un sujet, elle peut être utilisée comme une référence, permettant à des organisations de l'utiliser comme comparaison pour identifier des pistes d'amélioration. Pour faciliter ce processus de comparaison, des modèles de maturité ont été développés, permettant la mise en place de démarches d'accompagnement à l'évolution des organisations ou des processus.

**Définition** : Les modèles de maturité peuvent être considérés comme des ensembles d'artefacts dont les éléments sont disposés selon une échelle évolutive avec des transitions mesurables d'un niveau à l'autre et qui sont utilisés pour l'étalonnage, l'auto-évaluation et l'amélioration continue (Maier et al., 2020)

En général, ces modèles sont organisés en plusieurs axes ou dimensions, reflétant les différentes facettes du sujet étudié.

**Définition** : Les dimensions d'un modèle de maturité sont des domaines de capacités spécifiques, de domaines de processus ou d'objets de conception structurant le domaine concerné. Elles doivent être exhaustives et distinctes. Chaque dimension est précisée par un certain nombre de mesures (pratiques, objets ou activités) ou par des descriptions qualitatives pour chaque niveau de maturité. (Lizarralde Dorronsoro et al., 2020)

Chaque dimension est ensuite structurée en plusieurs niveaux de maturité, qui décrivent des états plus ou moins développés de fonctionnement des organisations ou processus.

**Définition** : Les niveaux de maturité représentent des états archétypaux de maturité d'une certaine dimension ou domaine. Chaque niveau doit avoir un descripteur indiquant clairement l'intention du niveau et une description détaillée de ses caractéristiques. Les caractéristiques de chaque niveau doivent être distinctes et vérifiables empiriquement. De plus, la relation de chaque niveau avec son prédécesseur et son successeur doivent être bien définies (Lizarralde Dorronsoro et al., 2020)

Les niveaux de maturité sont en général composés de pratiques clés permettant de décrire l'activité d'une organisation (Paulk et al., 1993).

Avec un modèle de maturité adapté, les entreprises peuvent à la fois mesurer clairement leur niveau et construire à partir de ce point un chemin évolutif vers un niveau souhaité (Kollros, 2021). C'est pourquoi des modèles de maturité ont été développés sur de nombreux sujets à travers les années : processus de développement de logiciels (Paulk et al., 1993), gestion des technologies informatiques (Becker et al., 2009), gestion de l'énergie pour la production durable (Ngai et al., 2013), gestion de projet (Backlund et al., 2014), capacité à innover des entreprises (Boly et al., 2014), etc. C'est également le cas pour le sujet de l'Industrie 4.0, dont différents modèles seront présentés par la suite dans ce chapitre.

### III. Dimensions d'un modèle de maturité

Afin de pouvoir étudier les modèles de maturité existants pour l'Industrie 4.0, nous avons souhaité identifier quelles sont les dimensions devant les constituer, c'est-à-dire les critères permettant d'évaluer la maturité des entreprises industrielles pour leur transformation technologique vers l'Industrie 4.0. La dimension technologique semble évidente, mais d'autres peuvent également entrer en ligne de compte. Par exemple, Dalenogare et al. indiquent que la transition des entreprises vers l'Industrie 4.0 doit intégrer l'aspect technologique, mais pas s'y limiter et être également réfléchi au niveau organisationnel, au niveau des compétences, ou encore à celui des processus. Les paragraphes suivants détaillent l'étude de littérature menée pour identifier nos dimensions.

Plusieurs publications ont souligné l'importance fondamentale, pour la bonne introduction de nouveaux éléments technologiques, et en particulier pour ceux de l'Industrie 4.0, de processus

---

matures, standardisés, transparents et reproductibles (Huber, 2016; Koether & Meier, 2017; Mayr et al., 2018). Dans leur article, Ike C. Ehie et Mogens Madsen soulignent que les entreprises qui tirent le mieux les bénéfices d'une nouvelle technologie sont celles mettant en place les changements nécessaires dans leur organisation et leurs processus (Ehie & Madsen, 2005). Cela indique que le niveau de **maîtrise des processus** de l'entreprise doit être pris en compte pour bien mesurer la capacité de l'entreprise à intégrer des nouvelles technologies. De plus, en cas d'identification de processus immatures lors de l'établissement du diagnostic, il semblerait qu'il serait pertinent d'émettre des recommandations orientant préalablement l'entreprise vers la maîtrise du processus en question avant d'envisager d'acquérir des technologies qui y seraient liées.

Un deuxième élément à prendre en compte pour le modèle de maturité est la pratique de **la conduite du changement** au sein de l'entreprise audité. En effet, la conduite du changement a été identifiée comme exerçant une forte influence positive sur la réussite des projets de transformation des entreprises (Hornstein, 2015; Jones et al., 2005). Dans leur modèle de maturité pour la maintenance, Poor & al. soulignent qu'il est indispensable pour une bonne transformation numérique des entreprises que les changements aient aussi lieu au niveau humain et organisationnel, en y incluant la culture du changement (Poór et al., 2020). L'analogie peut être faite avec la transformation technologique des entreprises au sens plus large. Ils précisent que pour ces changements puissent bien avoir lieu, les équipes doivent être prêts à accepter les évolutions de leur environnement de travail. Les changements sur ces sujets sont d'ailleurs parfois les plus difficiles à conduire (Pollák & Tkáč, 2019). Dans leur article, Fatorachian et Kazemi soulignent l'importance de prendre en compte le contexte socio-culturel lors de l'adoption d'une production de type Industrie 4.0 (Fatorachian & Kazemi, 2018). Kollros considère que, au vu de la complexité de la mise en place de l'Industrie 4.0, il est important de traiter le sujet de la conduite du changement (Kollros, 2021). L'Action Spécifique CNRS ADESI, projet centré sur l'identification de pistes de recherche autour de la conduite du changement, a soulevé, à travers son enquête auprès d'industriels, que 75% des facteurs freinant le changement dans les entreprises sont d'ordre organisationnel et culturel (Ben Zaïda, 2008; Crestani, 2005). En 2018, Morteza Ghobakhloo incluait, dans les axes de sa Roadmap pour une transition vers l'Industrie 4.0, l'implication de la direction pour la construction d'une stratégie de transformation technologique ainsi qu'une stratégie spécifique pour les ressources humaines, avec entre autres, une évolution des compétences des équipes (Ghobakhloo, 2018). C'est pourquoi le modèle de maturité devra intégrer la mesure de la capacité de l'entreprise à conduire le changement et l'évolution de la culture de l'entreprise. De plus, à l'instar de la maturité des processus, orienter les recommandations vers des progrès sur ce sujet avant même des suggestions de technologies à intégrer, si cela s'avère nécessaire.

---

Enfin, il est pertinent de s'intéresser aux technologies déjà connues au sein de la société. En effet, plus l'écart technologique est important entre les connaissances sur les technologies en place et celles nécessaires pour l'intégration d'un nouvel élément, et plus cette intégration au sein des processus de l'entreprise est complexe. Par exemple, Obiso et al. affirment que des technologies insuffisantes au sein d'une entreprise représentent une barrière à l'adoption des technologies de l'Industrie 4.0 (Obiso et al., 2019). Un modèle de maturité pour l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 intègre comme une de ses dimensions la maturité numérique de l'organisation, c'est-à-dire des technologies déjà déployées au sein de l'entreprise auditée (Danjou et al., 2017). Ses auteurs insistent sur l'importance de la progression graduelle des technologies pour aider à leur intégration. La **maturité technologique** de l'entreprise est donc un facteur important à intégrer à la conception du modèle de maturité.

Ces trois dimensions seront donc prises en compte pour évaluer la capacité des entreprises à intégrer des nouvelles technologies :

- La maturité des processus que l'entreprise met en place ;
- Le facteur humain avec la conduite du changement ;
- La maturité technologique de la société.

Ce sont les dimensions qui seront recherchées lors de l'étude des différents modèles déjà existants, afin d'identifier quels éléments ceux-ci mesurent pour déterminer le niveau de maturité de l'entreprise auditée sur ces dimensions.

#### **IV. Les modèles de maturité existants pour l'Industrie 4.0**

Les notions d'Industrie du futur et d'Industrie 4.0 désignent le développement de nouvelles technologies de production (Hofmann & Rüscher, 2017 ; Qin J. et al., 2016), offrant de nombreuses nouvelles possibilités pour les entreprises industrielles : interconnexion des machines, autonomisation de la production, fabrication additive, ... Tous les processus de ces entreprises (logistique, production, développement de nouveaux produits, ...) sont impactés par ces nouvelles technologies. En effet, l'industrie 4.0 s'étend du concept à la livraison du produit au client final, en passant par la commande, le développement et la production, et inclut également tous les services associés et la phase de recyclage (Lichtblau et al., 2018). Ces nouvelles technologies offrent une plus grande souplesse de

---

production, une personnalisation plus importante des produits, une gestion des produits uniques ou des petites séries plus faciles, etc.

Ces nouvelles possibilités attirent l'intérêt des entreprises, mais la mise en place de ces technologies peut représenter un défi important. Entre autres, cela nécessite des investissements importants et donc être une contrainte forte (Mittal et al., 2018), d'où l'importance que ces projets soient couronnés de succès. C'est pourquoi le développement d'outils d'audits des entreprises pour les accompagner dans l'acquisition de ces nouvelles technologies est un sujet qui fait actuellement l'objet de nombreuses études (plus de quinze publications entre 2014 et 2018 (Mittal et al., 2018)). Afin de construire le modèle de maturité, plusieurs de ces outils ont été étudiés pour en identifier les critères de mesure. L'identification de leurs caractéristiques permettrait de répondre à notre premier verrou scientifique.

Un premier modèle est celui de Qin, Liu et Grosvenor (Qin J. et al., 2016), qui présente une démarche guidant les entreprises vers l'Industrie 4.0 par le développement de systèmes cyber-physiques au sein de leurs technologies de production. Les cinq niveaux de maturité de ce modèle sont basés sur la digitalisation et l'autonomie des composantes technologiques du système de production, mais ils ne prennent pas en compte les aspects de maturité des processus ou les aspects humains de l'intégration technologique.

Le modèle publié par Kannan, Suri, Cadavid & al. est basé sur les standards de systèmes industriels reconnus par la Société Internationale d'Automatisation (ISA) (Kannan et al., 2017). Il propose une démarche en 3 phases pour identifier les besoins de l'entreprise pour atteindre ces standards par l'acquisition de nouveaux éléments du système de production. Ce modèle est donc principalement centré sur les technologies en place au sein de l'entreprise sans intégrer les aspects humains ou de processus. De plus, les standards de l'ISA sont exigeants et peuvent être difficile à atteindre pour certaines entreprises, en particulier les PME.

Le modèle proposé par Jung, Kulvatunyou, Choi et Brundage développe 4 dimensions (Jung et al., 2016) : la maturité organisationnelle (incluant la formalisation des processus et la définition des responsabilités), la maturité des technologies de l'information (concernant la présence et la maîtrise de différents outils et méthodes numériques), la maturité en gestion de la performance (centrée sur la gestion des indicateurs et du pilotage) et la maturité de la connectivité (étudiant les méthodes et le degré de circulation des informations au sein de l'entreprise). On y retrouve bien des éléments sur la maturité des processus et sur la maturité technologique, mais les technologies évaluées sont principalement celles de la communication et ne couvrent pas tout le spectre des technologies de

---

production ou celles de l'Industrie 4.0. De plus, le facteur humain et la conduite du changement ne sont pas pris en compte dans ce modèle.

Jaione Ganzarain et Nekane Errasti ont proposé une démarche en 3 étapes pour la transformation des entreprises vers l'Industrie 4.0 (Ganzarain & Errasti, 2016) : développement d'une vision spécifique de l'Industrie 4.0, renforcement de la vision avec les caractéristiques de l'entreprise et conception des projets de transformation, mise en place des projets de transformation (incluant la gestion des risques et de la formation pour le personnel). Pour ce faire, cette démarche se repose sur une échelle de maturité de la stratégie Industrie 4.0 de l'entreprise en 5 niveaux : : Initial (pas de vision spécifique pour l'Industrie 4.0) – Géré (existence d'une roadmap pour l'Industrie 4.0) – Défini (Segmentation des clients, proposition de valeur et ressources clés définies) – En transformation (stratégie déclinée en tâches spécifiques) – Business Model détaillé (Business model complètement tourné vers Industrie 4.0). Ils ont aussi précisé quels niveaux de développement du business model et de gestion du portefeuille de projets liés à l'Industrie 4.0 doivent être atteints pour valider chaque niveau de l'échelle. Cette échelle détaille bien des niveaux de maturité pour la construction d'une stratégie de développement technologique, qui est une composante importante de la conduite du changement. Néanmoins, on ne retrouve pas les aspects de processus ou technologiques qui nous semblent également nécessaires pour mener à bien les transformations au sein des entreprises.

En 2017, Danjou, Rivest et Pellerin indiquent que la plupart des modèles de maturité pour l'Industrie 4.0 se concentrent sur trois sujets (Danjou et al., 2017): la maturité des technologies, de type *Technology Readiness Level* (TRL) (International Organization for Standardization, 2013) ; la maturité de déploiement de ces technologies au sein des entreprises, mesurant les progrès et proposant des démarches de déploiement, comme le modèle de (Ganzarain & Errasti, 2016) présenté ci-dessus; la maturité numérique des entreprises, traitant le niveau des technologies déployées dans l'organisation audité, ainsi que des éléments humains et organisationnels. Ils soulignent également que ces modèles ne prennent en général pas en compte le positionnement stratégique des entreprises accompagnées. C'est pourquoi ils proposent ensuite leur modèle, dans l'optique de permettre aux entreprises accompagnées d'identifier le positionnement stratégique qu'elles souhaitent adopter et ainsi identifier les technologies qui leur seraient nécessaires. Ce positionnement stratégique se définirait sur deux axes. Le premier élément est le choix de se concentrer sur le développement de ses produits, de ses processus ou de ses services. Le second est le niveau voulu de capacités des systèmes technologiques pour ces produits, processus ou services. Ces capacités des systèmes technologiques se déclinent sur quatre niveaux de maturité, où un niveau progresse en bâtissant sur le précédent :

- 
- Surveillance, où les capteurs permettent la collecte de données, la création d'alertes et le suivi des processus de production ;
  - Contrôle, où les logiciels embarqués dans les systèmes numériques en permettent le contrôle ;
  - Optimisation, où le traitement de données par algorithmes permet l'identification de possibilités d'améliorations ou de diagnostics préventifs ;
  - Autonomie, où la combinaison des technologies des trois précédents niveaux permet le que le système lance de lui-même des actions pour assurer son fonctionnement, son maintien et son optimisation.

Ainsi, lorsqu'une entreprise a choisi son positionnement stratégique et le niveau technologique qu'elle souhaite mettre en place, des technologies lui sont conseillées pour atteindre ce positionnement. Ce modèle traite de la dimension technologique, ainsi que de l'aspect stratégique de la conduite du changement. Cependant, d'autres aspects de la conduite du changement manquent, ainsi que la dimension de maturité des processus.

En 2016, le cabinet de conseil Pwc a publié un modèle de maturité pour l'Industrie 4.0 qui cible principalement les stratégies de numérisation des entreprises, car il les considère comme les clés pour la mise en place des technologies de l'Industrie 4.0 (Geissbauer et al., 2016). Ce modèle repose sur 7 dimensions : Numérisation du business model, Intégration numérique des chaînes de valeur, Numérisation des offres de produits et services, Analyse des données, Agilité de l'architecture informatique, Respect des règles de sécurité, Organisation et culture numérique. L'entreprise est ensuite classée en fonction de ces capacités sur ces dimensions entre quatre niveaux : novice, intégrateur vertical, collaborateur horizontal, champion numérique. Ces dimensions sont principalement centrées sur des éléments de maturité technologique. On y retrouve également quelques aspects de maturité des processus (par exemple, au travers des dimensions « Numérisation du business model » ou « Intégration numérique des chaînes de valeur »), mais ils sont peu développés et principalement vus au travers de la mise en place d'outils numériques permettant d'appliquer ces processus. La dimension « Organisation et culture numérique » répond à notre recherche d'éléments sur le facteur humain, mais n'est que peu développé, ne traitant que la capacité de collaboration et les moyens numériques pour la soutenir.

Le modèle publié par l'entreprise Rockwell Automation est également très centré sur les aspects technologiques de la transformation vers l'Industrie 4.0 (Rockwell Automation, 2014). Il présente 4 dimensions liées à des familles de technologies jugées cruciales pour atteindre les standards de l'Industrie du futur : Infrastructure de l'information (matériel et logiciel), Machines et contrôle, Gestion des réseaux et interconnectivité des éléments, Politique de sécurité. On n'y retrouve pas les

---

dimensions de maturité des processus ou de conduite du changement. La classification des différentes familles de technologies pourra en revanche être intéressante au moment de la construction des recommandations.

En 2015, la VDMA (Association allemande de l'industrie mécanique) a publié un document présentant une approche développée spécialement pour accompagner les PME lors de leur évolution vers l'Industrie 4.0 (Anderl & Fleischer, 2015). Elle prend place en cinq étapes : Préparation, Analyse de l'existant, Créativité et définition d'un nouveau business model, Evaluation et sélection des technologies, Implantation et application. Ce document présente aussi une « boîte à outils Industrie 4.0 » présentant douze familles de technologies réunies par leur fonction (comme « interface homme-machine » ou « traitement des données de production »). Chacune de ces familles est déclinée sur 5 niveaux d'avancement des technologies. Par exemple, pour la famille « traitement des données de production », le premier niveau est défini comme « pas de traitement de données », et cela progresse jusqu'au niveau 5, « Contrôle et planification automatique du processus de production ». Ces familles de technologies sont ainsi utilisées comme des grilles de maturité des technologies mises en place au sein de l'entreprise. Il n'y a donc pas d'évaluation de la maturité des processus ou de la capacité à conduire le changement, même si les auteurs ont souligné l'importance de la formation du personnel lors de la mise en place de nouveaux éléments technologiques. Comme pour l'article précédent, cette classification des technologies pourra être utilisées comme une base pour notre système de recommandations.

Le modèle de Wagire et al. est établi sur sept dimensions : Personnel et culture ; Sensibilisation à l'Industrie 4.0 ; Stratégie organisationnelle ; Chaîne de valeur et processus ; Technologies du *Smart Manufacturing* ; Technologies orientées produits et services ; Technologies de base de l'Industrie 4.0 (Wagire et al., 2021). Chacune de ces dimensions est mesurée grâce à différents critères. Par exemple, « support de la direction » est utilisée pour mesurer la dimension « Personnel et culture », ou bien « Suivi et contrôle en temps réel » pour la dimension « Chaîne de valeur et processus ». Les dimensions « Personnel et culture » et « Stratégie organisationnelle » couvrent le sujet de la conduite du changement, de même que les dimensions « Technologies du *Smart Manufacturing* », « Technologies orientées produits et services », « Technologies de base de l'Industrie 4.0 » et « Sensibilisation à l'Industrie 4.0 » traitent la maturité technologique. La maturité des processus est bien envisagée, via la dimension « Chaîne de valeur et processus » mais les cinq items de cette dimension semblent insuffisants pour pouvoir réellement analyser tous les aspects de la maturité des processus, surtout que certains semblent plutôt s'intéresser à la technologie, comme le critère « numérisation de la chaîne de valeur horizontale ».

---

Un autre article, publié par Colli & al. en 2019, examine plusieurs modèles de maturité (dont ceux de Rockwell Automation ou celui de Qin & al.) et souligne l'importance d'une approche plus individuelle et prenant bien en compte les spécificités des entreprises (Colli et al., 2019). Il propose ensuite un cadre de référence pour l'évaluation de la maturité pour la transformation numérique. Avec celui-ci, l'entreprise est évaluée sur cinq éléments, chacun sur une échelle de six niveaux (du niveau 1 « basique » à niveau 5 « intégré », plus un niveau 0 si l'élément n'est pas du tout implanté). Ces cinq éléments couvrent les trois dimensions que nous considérons important pour l'intégration de nouvelles technologies : maturité technologique avec « Technologie » et « Connectivité », conduite du changement avec « Compétences » et « Gouvernance », et maturité des processus avec « Création de valeur ». Néanmoins, ces cinq éléments nous semblent insuffisants pour représenter suffisamment bien les trois dimensions (en particulier la maturité des processus, avec un seul élément) ou pour mesurer de manière suffisamment précise les capacités de l'entreprise pour établir les bonnes recommandations.

L'article de Lee, Jun, Chang et Park publié en 2017 présente une démarche basée sur des outils d'aide à la décision multicritères (J. Lee et al., 2017). Il propose un tableau de critères permettant d'évaluer le niveau de maturité de l'entreprise, divisés en sous-critères, eux-mêmes associés à des critères d'évaluation. On y retrouve beaucoup d'éléments permettant de mesurer la maturité des processus (par exemple, « planification de la production » ou « gestion de la logistique »), sans que ce soit nécessairement associé à l'utilisation de certaines technologies. D'autres critères se concentrent eux sur la maturité de certaines technologies au sein de l'entreprise, comme le sous-critère « système d'information » par exemple. On y retrouve néanmoins peu d'éléments sur le facteur humain ou la conduite du changement, uniquement présent dans le critère « Leadership ».

Un autre article propose un index de maturité permettant de calculer le niveau de préparation des entreprises pour l'adoption de technologies de l'Industrie 4.0 (Schumacher et al., 2016). Ce modèle propose 9 dimensions prenant en compte les trois aspects que nous recherchons : maturité des processus (les dimensions « produits » et « opérations », par exemple), maturité technologique (la dimension « technologie », en particulier), facteur humain et conduite du changement (les dimensions « leadership » ou « culture », par exemple). Néanmoins, une fois les pratiques composant ces dimensions analysées, les aspects de maturité des processus sont finalement peu représentés, de même que l'aspect humain.

De nombreux modèles sur le sujet de la maturité des entreprises pour les technologies de l'Industrie 4.0 ont donc été publiés. Néanmoins, peu prennent en compte les trois dimensions qui ont été

précédemment identifiées comme nécessaires, ou les traitent de manière satisfaisante (Tableau 2). La plupart sont principalement concentrés sur les aspects technologiques, comme (Anderl & Fleischer, 2015; Ganzarain & Errasti, 2016; Kannan et al., 2017; Qin J. et al., 2016; Rockwell Automation, 2014). Le point de départ de l'Industrie 4.0 étant l'apparition et le développement de nouvelles technologies, il n'est pas surprenant que ce soit l'aspect le plus présent. Néanmoins, comme relevé précédemment, il n'est pas suffisant. D'autres modèles abordent également les aspects de maturité des processus, mais d'autres aspects sont alors insatisfaisants, comme (Jung et al., 2016) ou (J. Lee et al., 2017) ne traitant pas ou trop peu de la conduite du changement. La plupart des modèles traitant des aspects de conduite du changement semblent incomplets sur le sujet, tels que (Danjou et al., 2017), (Geissbauer et al., 2016) ou encore (Colli et al., 2019). La synthèse de l'étude de ces modèles est présentée dans le Tableau 2.

Article	Référence	Maturité technologique	Maturité processus	Conduite changement	Résultats
A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond	(Qin J. et al., 2016)	Oui	Non	Non	Lacunes en matière de capacités à combler
Towards Industry 4.0 : Gap Analysis between Current Automotive MES and Industry Standards using Model-based Requirement Engineering	(Kannan et al., 2017)	Oui	Non	Non	Identification de technologies répondant aux besoins de l'entreprise
An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment	(Jung et al., 2016)	Oui	Oui	Non	Niveau de maturité sur 4 dimensions
Three Stage Maturity Model in SME's towards Industry 4.0	(Ganzarain & Errasti, 2016)	Oui	Insuffisant	Insuffisant	Niveau de maturité de la stratégie de mise en œuvre de l'Industrie 4.0
Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie	(Danjou et al., 2017)	Oui	Non	Insuffisant	Suggestions de technologies en fonction du positionnement stratégique
Industry 4.0: Building the digital enterprise	(Geissbauer et al., 2016)	Oui	Insuffisant	Insuffisant	Niveau de maturité sur 7 dimensions, principalement technologiques
The Connected Enterprise Maturity Model	(Rockwell Automation, 2014)	Oui	Non	Non	Plan d'action en cinq étapes

Guideline Industrie 4.0 - Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses	(Anderl & Fleischer, 2015)	Oui	Non	Non	Niveaux de maturité dans 12 familles technologiques
Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice	(Wagire et al., 2021)	Oui	Insuffisant	Oui	Niveaux de maturité sur 7 dimensions
A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era	(Colli et al., 2019)	Insuffisant	Insuffisant	Insuffisant	Niveaux de maturité sur 5 éléments
A smartness assessment framework for smart factories using analytic network process	(J. Lee et al., 2017)	Oui	Oui	Insuffisant	Niveaux de maturité
A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises	(Schumacher et al., 2016)	Oui	Insuffisant	Insuffisant	Niveaux de maturité sur neuf dimensions avec graphiques radars détaillés

Tableau 2. Tableau récapitulatif des modèles étudiés pour l'état de l'art

Les modèles étudiés lors de cet état de l'art ne traitent pas ou pas suffisamment les trois dimensions recherchées. Le choix a donc été fait de développer notre propre modèle de maturité qui sera présenté dans le chapitre suivant.

## Chapitre 2

---

### Construction du modèle de maturité

---

<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>37</b>
<b>II. METHODE DE DEVELOPPEMENT DU MODELE DE MATURETE .....</b>	<b>37</b>
<b>III. PREMIERE VERSION DU MODELE DE MATURETE.....</b>	<b>38</b>
<b>IV. CONFRONTATION DU MODELE 2MTI AVEC DES EXPERTS .....</b>	<b>42</b>
<b>V. CONSTRUCTION DE LA SECONDE VERSION DU MODELE DE MATURETE.....</b>	<b>44</b>
<b>A. MATURETE DES PROCESSUS .....</b>	<b>44</b>
<b>B. MATURETE TECHNOLOGIQUE .....</b>	<b>64</b>
<b>C. CAPACITE A CONDUIRE LE CHANGEMENT .....</b>	<b>86</b>
<b>VI. CONCLUSION.....</b>	<b>93</b>

## I. Introduction

Lors de l'établissement de l'état de l'art, présenté dans le chapitre précédent, nous avons identifié de nombreux modèles de maturité existant pour la mise en place des technologies de l'Industrie 4.0.

Néanmoins, nous n'avons pas trouvé de modèles prenant de manière satisfaisante les trois dimensions déterminées comme nécessaires : la maturité technologique, la maturité des processus et la capacité à conduire le changement. Pour répondre à cette problématique, nous avons décidé de développer notre propre modèle de maturité sur le sujet.

Ce développement est l'objet de ce chapitre. La première partie présente la démarche suivie pour développer le modèle, puis la deuxième partie décrit la démarche de développement d'une première version du modèle de maturité. La troisième partie relate la consultation que nous avons menée auprès d'un panel d'experts et leurs réponses. Suite à ces retours et à une revue de littérature, nous avons développé une seconde version de notre modèle de maturité.

## II. Méthode de développement du modèle de maturité

La décision ayant été prise de développer notre propre modèle de maturité, il était d'abord nécessaire d'identifier la démarche de construction.

Becker et al. indiquent que les étapes initiales pour la construction d'un modèle de maturité sont la définition du sujet et la recherche des modèles existants sur le sujet traité pour comparaison (Becker et al., 2009). Charles W. Rosenthal a proposé une démarche pour le développement d'une méthode d'évaluation de la maturité du processus de conception de produit dans le monde de l'électronique (Rosenthal, 1991). Les différentes étapes de cette démarche sont : la caractérisation et la définition des niveaux de maturité ; la validation et l'enrichissement du modèle grâce à des entretiens avec des experts ; le test du modèle sur le terrain. En unissant ces deux démarches, nous avons suivi les étapes successives suivantes (Figure 4) :

- 1) Définition du sujet du modèle et de ses dimensions
- 2) Recherche des modèles existants sur le sujet et comparaison
- 3) Définition et caractérisation des dimensions de notre modèle
- 4) Validation de notre modèle par la confrontation auprès d'experts, puis correction et enrichissement grâce à leurs retours

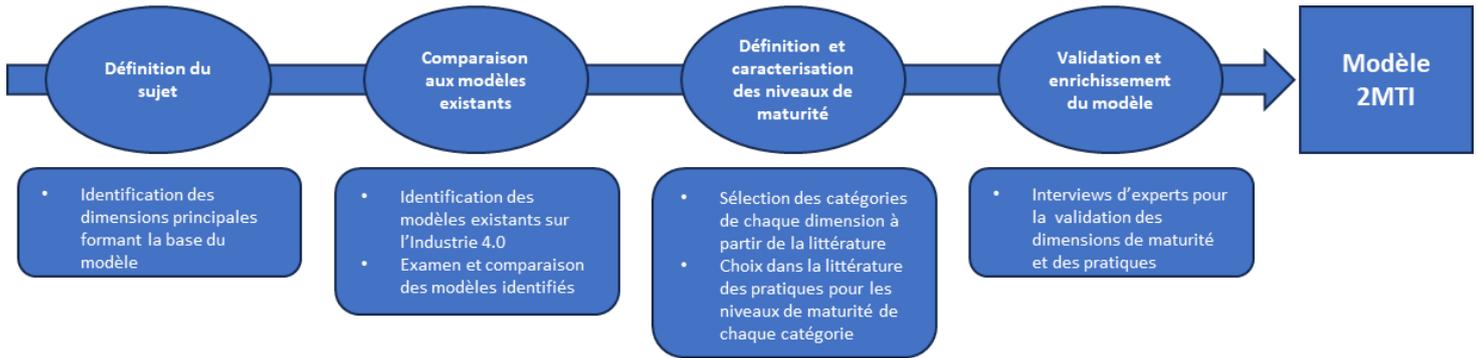


Figure 4. Démarche de construction du modèle de maturité

### III. Première version du modèle de maturité

Une fois les définitions du sujet et de ses dimensions faites, et l'étude des modèles existants réalisée (cf. Chapitre 1), nous avons par la suite cherché à établir un modèle par l'agrégation de pratiques issues de ces modèles. L'objectif était de sélectionner des pratiques représentant les trois dimensions identifiées, durant notre étude de la littérature, comme étant nécessaires pour la bonne intégration de nouvelles technologies : la maturité des processus, la maturité technologique et la dimension de conduite du changement.

Le premier modèle choisi pour cette agrégation est celui de (J. Lee et al., 2017). En effet, il présente de nombreuses pratiques liées à la maturité des processus. Parmi ces pratiques, on trouve par exemple « gestion des informations pour la planification de la production », « gestion de la progression de la production » ou encore « gestion de la demande de matière première ». Néanmoins, il est moins complet sur les deux autres dimensions : la maturité technologique, quasi-exclusivement centrée autour de l'automatisation de différents processus ou de certains systèmes logiciels ; et la capacité à conduire le changement, principalement concentrée sur la mise en place de stratégie ou de leadership de la direction.

C'est pourquoi le modèle de Lee et al. a été associé avec celui proposé par (Schumacher et al., 2016). En effet, ce dernier était plus développé sur la dimension de maturité technologique, avec des pratiques comme « numérisation des ventes et services », « modélisation et simulation » ou encore « utilisation de communication machine-à-machine ». La dimension de maturité des processus est représentée, mais elle l'est significativement moins que dans le modèle précédent. Sur la dimension humaine, le modèle de Schumacher et al. est plus riche que celui de Lee et al., et traite de sujets plus larges, comme des éléments de culture d'entreprise ou de compétences des équipes. Les deux

modèles ont donc été considérés comme complémentaires et permettaient, une fois réunis, une couverture correcte de nos trois dimensions.

Par l'association de ces deux modèles, nous nous sommes retrouvés, sur certains sujets traités par les deux, avec certaines pratiques constituant des doublons. Il était donc nécessaire de les identifier et de procéder à des sélections ou des fusions pour éviter ces répétitions. Par exemple, les pratiques « Strategy and plan for implementing smart factory » issue de Lee et al. et « Implementing Industry 4.0 roadmap », de Schumacher et al., sont très similaires. Nous avons alors uniquement retenu la pratique « Implementing Industry 4.0 Roadmap ». Cela a finalement constitué un ensemble de 63 pratiques : 37 liées à la maturité des processus, 17 liées à la maturité technologique et 9 liées au facteur humain (capacité de conduite du changement et d'apprentissage). Ces pratiques sont déclinées sur 5 niveaux de maturité, à l'instar de nombreux autres modèles de maturité existants (par exemple, ceux de (Qin J. et al., 2016), (Ganzarain & Errasti, 2016), ou encore (Schumacher et al., 2016)).

Afin de mieux structurer les pratiques du modèle, nous avons analysé le modèle du cabinet de conseil allemand Roland Berger (Gimélec, 2014). Ce modèle classifie des technologies de production sur 8 axes : Pilotage de la production, Traçabilité, Gestion des flux, Fiabilité/qualité, Flexibilité de la production, Maintenance, Organisation du travail, Conception. Ces 8 axes permettant de décrire les caractéristiques du système industriel des entreprises, elles ont été choisies comme base les dimensions de maturité des processus et de maturité technologique de notre modèle. Nous avons alors associé les pratiques identifiées avec ces 8 axes pour constituer notre Modèle de Maturité pour l'Intégration Technologique (*Maturity Model for Technological Integration - 2MTI*) (Figure 5).

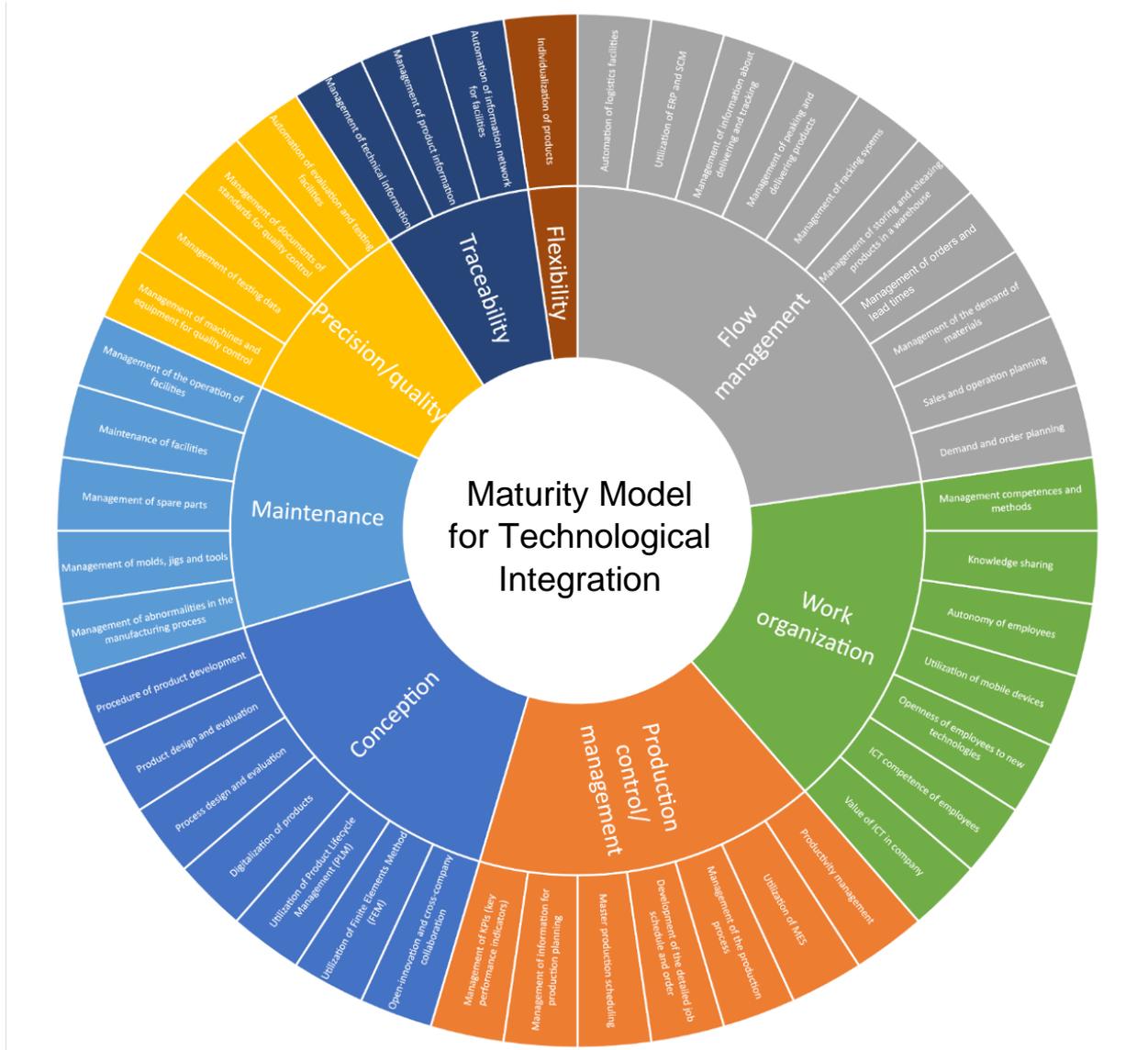


Figure 5. Le Modèle de Maturité pour l'Intégration Technologique (première version), ses huit axes et ses pratiques

Pour les traiter de manière plus simple, chacun de ces huit axes a été associé à deux échelles de maturité, une pour la maturité des processus et une pour la maturité technologique (Figure 6).

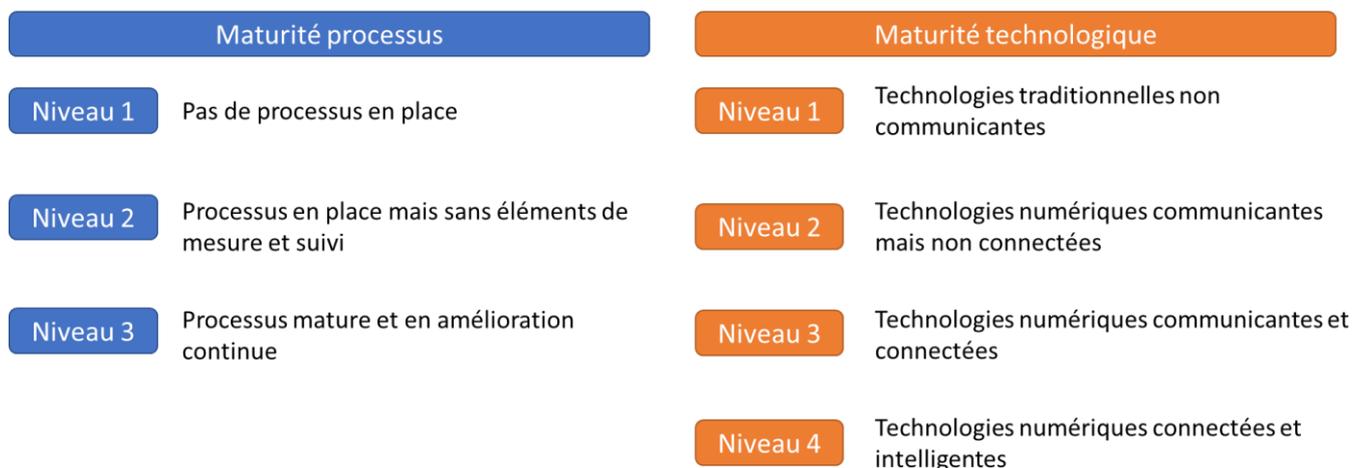


Figure 6. Echelles générales de maturité des axes pour la première version du modèle de maturité

L'échelle de maturité des processus est construite sur trois niveaux (Tableau 3). Nous nous sommes inspirés de l'échelle de maturité proposée par Grabowska et Takala, qui classent leurs pratiques de gestion de la qualité sur trois niveaux (Grabowska & Takala, 2018) : processus immature, processus de maturité moyenne, processus mature. Ces niveaux ont été définis et précisés grâce aux niveaux présentés dans le modèle de Dutta et al., qui proposaient un modèle de maturité en cinq niveaux (Dutta et al., 2021). Le premier niveau de ce dernier modèle est assimilé au premier niveau du précédent. De même, les niveaux maximums des deux modèles sont associés. Pour le niveau intermédiaire, nous avons sélectionné le niveau 3 du modèle de Dutta et al.

Niveau 1	Pas de processus formellement en place
Niveau 2	Un processus en place et formalisé, mais sans éléments de mesure et de suivi
Niveau 3	Un processus formalisé, piloté grâce à des éléments de mesure et de suivi, faisant l'objet d'amélioration continue

Tableau 3. Echelle générale de maturité pour la maturité des processus pour la première version du modèle de maturité

La seconde échelle, celle de maturité technologique, est conçue sur quatre niveaux (Tableau 4). Elle est inspirée par les trois niveaux présentés par Qin et al., qui classifient des technologies en fonction de leurs capacités numériques (Qin J. et al., 2016) : contrôle numérique ; intégration au réseau ; machines intelligentes. Une autre inspiration est le modèle de Danjou et al. Il est constitué de quatre niveaux de maturité technologique (Danjou et al., 2017) : surveillance ; contrôle ; optimisation ; autonomie. Un autre élément pris en compte pour la construction de cette échelle est le fait que toutes les entreprises ne sont pas immédiatement concernées par des technologies aussi avancées que celles de l'Industrie 4.0. En effet, un certain nombre d'entre elles, en particulier les PME, n'ont pas

nécessairement les ressources technologiques déjà en place pour intégrer des technologies aussi avancées (Mittal et al., 2018). Un modèle ne prenant en compte que ces éléments technologiques ne serait donc pas adapté à toutes les entreprises, ce qui est contraire à notre objectif. Ainsi, il est nécessaire d'intégrer des niveaux inférieurs correspondant à des technologies moins avancées pour pouvoir s'adresser à ces entreprises, les auditer et leur fournir un accompagnement :

Niveau 1	Technologies traditionnelles non communicantes
Niveau 2	Technologies numériques communicantes mais non connectées
Niveau 3	Technologies numériques communicantes et connectées à un réseau d'entreprise
Niveau 4	Technologies numériques connectées et intelligentes

Tableau 4. Echelle générale de maturité pour la maturité technologique pour la première version du modèle de maturité

La dimension de conduite du changement ne semblait pas liée aux axes du modèle de Roland Berger. Cette dimension paraît plus transversale, liée à l'ensemble de l'entreprise plutôt qu'à des axes spécifiques. Il a donc été décidé qu'elle serait intégrée de deux manières. Premièrement, pour chacune des échelles de maturité des processus ou des technologies, il sera nécessaire d'évaluer si les compétences des équipes permettent d'exploiter effectivement les maturités précédemment mesurées. Deuxièmement, un axe de capacité à conduire le changement de manière transversale sera construit.

#### IV. Confrontation du modèle 2MTI avec des experts

Afin de valider les différents éléments composant ce modèle, une série d'interviews d'experts a été menée. Les experts interrogés ont été sélectionnés au sein de cinq différentes entreprises lorraines de la métallurgie. Cette sélection s'est concentrée sur le fait de choisir des personnes issues d'entreprises aux profils différents mais toujours à des postes impliquant des compétences pertinentes pour les dimensions du modèle de maturité (Tableau 5).

	<b>Domaine entreprise</b>	<b>Effectifs entreprise</b>	<b>Poste expert</b>
Expert n°1	Visserie	143 personnes	Responsable prospective et innovation
Expert n°2	Systèmes automatisés	44 personnes	Gérant
Expert n°3	Câbles industriels	261 personnes	Directeur technique
Expert n°4	Systèmes de direction automobile	877 personnes	Senior manager engineering and smart manufacturing
Expert n°5	Equipementier automobile	100 personnes	Président Directeur Général

*Tableau 5. Profil des experts interrogés lors de la série d'interviews*

Les entretiens comportaient, après l'introduction, deux grandes phases :

- Après une présentation des trois dimensions du modèle, il a été demandé aux experts de valider leur intérêt et la manière dont elles sont intégrées dans le modèle ;
- Après une présentation, un par un, des différents axes du modèle, il leur a été demandé leur avis sur leur définition, leur pertinence individuelle, et si l'ensemble permettrait de représenter correctement le système industriel des entreprises.

D'autres éléments ont également été traités lors de ces entretiens, mais ils seront abordés dans le chapitre 4.

A l'issue de ces entretiens, plusieurs conclusions ont pu être tirées. Un premier résultat est la validation par les cinq experts de l'importance des trois dimensions du modèle (maturité des processus, maturité technologique, conduite du changement). Ils partagent le fait que la dimension de conduite du changement doit être mesurée de manière transversale à l'entreprise, ou la manière dont est structurée l'échelle de la maturité technologique en quatre niveaux pour les huit axes.

L'échelle de maturité des processus a été discuté car, pour certains experts, trois niveaux est une échelle trop réduite pour bien distinguer les situations des entreprises et que certaines nuances pertinentes risqueraient de ne pas être perçues.

Les retours sont plus mitigés sur les axes du modèle. Pour la maturité technologique, ces axes sont bien compris et validés par les experts, même si des remarques ont été faites sur leur définition. Cependant, le fait d'appliquer les mêmes axes sur la dimension de maturité des processus n'est pas aussi bien accepté, les experts soulignant que les axes étant tirés d'une classification de technologies,

ils ne correspondent pas parfaitement à la structuration des processus des entreprises industrielles. En particulier, le fait que les sujets de flexibilité et de traçabilité soient des axes de maturité des processus à part entière a été fortement discuté, car ils peuvent être considérés comme des caractéristiques d'autres axes. Par exemple, la flexibilité peut être considérée comme une spécificité du pilotage de la production.

Un autre point parmi les axes qui a été soulevé concerne les pratiques de conception. D'après les experts, il est important de prendre en compte ce sujet, car il peut représenter une activité cruciale, et apporter de réels avantages concurrentiels. Néanmoins, toutes les entreprises industrielles ne sont pas concernées car elles ne mettent pas toutes en place ce processus. Un expert donne l'exemple d'un de ses sous-traitants, usineur, qui n'a pas d'activités de conception. En effet, c'est l'entreprise de l'expert qui réalise tout le développement du produit et de ses spécifications, et fournit tous les plans et les détails des pièces à réaliser, et le sous-traitant ne fait que produire.

Ces retours soulignent la nécessité de retravailler les caractérisations des axes, en particulier pour ceux de la maturité des processus.

## **V. Construction de la seconde version du modèle de maturité**

A la suite des retours des experts sur la première version de notre modèle, il a été décidé de repartir des trois dimensions identifiées (capacité à conduire le changement, maturité des processus et maturité technologique) et de mener une revue de littérature plus approfondie pour identifier les axes pertinents de ces dimensions.

### **a. Maturité des processus**

L'importance de processus matures et maîtrisés pour l'introduction de nouvelles technologies au sein d'une entreprise a bien été validée par les experts. Néanmoins, la première sélection d'axes pour la maturité des processus ayant été remise en cause, il est nécessaire pour la construction du modèle de maturité d'identifier quels processus permettent de décrire le système industriel de l'entreprise.

J. P. Kaushish relève dans son livre « Manufacturing processes » trois grands processus présents dans toutes les entreprises industrielles. Ce sont la gestion de la qualité, la conception des produits et les processus de fabrication (Kaushish, 2010). Un autre processus important pour les entreprises industrielles est la gestion de leur maintenance. Cette gestion est considérée comme

une fonction importante, à valeur ajoutée, et ce encore plus avec l'augmentation de la numérisation et de l'automatisation des équipements (Maier et al., 2020). Il y a également un consensus pour estimer que la maintenance des équipements est un facteur important pour la capacité d'une organisation à fournir des résultats de qualité (Madu, 1999). et dans les temps à leurs clients et avoir une avance concurrentielle, car elle permet l'amélioration de la performance du système de production (Cooke, 2000; Madu, 2000). Enfin, les processus de logistique devront être pris en compte puisque la logistique influe sur la capacité des entreprises industrielles à satisfaire leurs clients et leur performance globale (Tracey, 1998).

Un modèle très répandu présentant des activités d'entreprises est la chaîne de valeur de Michael Porter (Porter, 1985). Ce modèle présente des activités primaires ajoutant de la valeur aux produits (logistique entrante, Opérations, logistique sortante, marketing et ventes, service) et des activités de support pour améliorer l'efficacité des activités primaires (infrastructure, développement technologique, gestion des ressources humaines, achats). L'activité « opérations » peut être liée au processus de conception, de même que les activités « logistique entrante », « logistique sortante » et « achats » peuvent l'être au processus de logistique. Les sujets de marketing, de ventes, ou de gestion des ressources humaines ont été mis de côté, car considéré comme ne faisant pas parti du périmètre de notre modèle.

Dans leur article, Lee et al. ont listé six processus pour les opérations industrielles (J. Lee et al., 2017). Ces processus sont le développement de produits, la planification de la production, le contrôle de la qualité, la gestion de la logistique, la gestion de l'usine et le contrôle du processus de production.

L'*American Productivity and Quality Center* (APQC - <https://www.apqc.org/>), association étudiant les meilleures pratiques dans les entreprises industrielles, a proposé en 2018 une taxonomie des principaux processus d'entreprises (American Productivity & Quality Center, 2018). Dans ce document, de nombreuses activités sont relevées, réunies en processus, eux-mêmes regroupés en catégories générales de processus. Ces dernières appartiennent à deux groupes : les processus opérationnels, où on retrouve « développement d'une vision et d'une stratégie », « développement et gestion des produits et services », « marketing et vente des produits et services », « livraison des produits physiques », « livraison des services », « gestion du service client », et les processus support et de gestion, avec « développement et gestion du capital humain », « gestion des technologies de l'information », « gestion des ressources financières », « acquisition, construction et gestion des actifs », « gestion des risques d'entreprise, conformité, remédiation et résilience », « gestion des relations extérieures » et « développement et gestion des capacités commerciales ». Les processus de livraison des produits ou des services peuvent être assimilés à de la logistique, mais intègrent

également leur phase de production, avec des pratiques comme « planification de la production » ou « production/assemblage des produits », ainsi que les activités de qualité, avec des pratiques comme « développement de normes et standards de qualité » ou « application de tests de qualité », ou encore de maintenance, avec les pratiques « planification de maintenance préventive ». La plupart des activités de maintenance sont néanmoins présentes dans le processus « acquisition, construction et gestion des actifs », qui intègre des pratiques telles que « assurance de la maintenance des actifs » ou « développement des stratégies de maintenance ». Le sujet de conception des produits est couvert par le processus « développement et gestion des produits et services ». Parmi ces grands processus, certains ont été identifiés comme ne faisant pas partie du cadre de notre étude, comme la gestion des risques ou des ressources financières ou humaines, les capacités commerciales, le marketing ou le développement de la stratégie de l'entreprise. De plus, certaines pratiques liées aux sujets technologiques comme la gestion des technologies de l'information sont plutôt destinées à être traitées dans les échelles de maturité technologique.

Zheng et al. proposent en 2020, après une revue de plusieurs modèles issus de la littérature, une liste de dix grandes pratiques des entreprises industrielles (Zheng et al., 2021) : développement de nouveaux produits, configuration de la chaîne logistique, planification intégrée de la chaîne logistique, logistique interne, planification et contrôle de la production, gestion de l'énergie, gestion de la qualité, gestion de la maintenance, gestion de la relation clients, gestion de l'après-vente. On y retrouve les aspects de production, de maintenance, de conception de nouveaux produits, de qualité et de logistique (en trois processus différents) relevés précédemment dans d'autres modèles. Les processus de gestion de l'après-vente et de gestion de l'énergie ont été écartés car étant extérieur au cadre du modèle. Les activités reportées dans la description du processus de gestion de la relation clients peuvent être rapprochés d'autres processus, comme la conception des produits pour l'identification des besoins par exemple.

A la suite de cette étude de littérature, cinq grandes activités ont été retenues comme axes pour notre dimension de maturité des processus : gestion de la production, gestion de la qualité, gestion de la logistique, gestion de la maintenance et conception de produits/processus.

Une échelle générale a été construite en quatre niveaux pour la maturité des processus (Tableau 6). Elle a été inspirée par le modèle de maturité des capacités (*Capability Maturity Model, CMM*) de Paulk & al. (niveau initial, répétable, défini, géré, en optimisation) (Paulk et al., 1993), le modèle de maturité des processus qualité de (Dutta et al., 2021) (ad hoc, répétable, défini, piloté, en amélioration continue) ou celui de maturité du système de maintenance de (Maier et al., 2020) (statut initial, géré, défini, piloté quantitativement, en optimisation). Ainsi, nous avons cherché à répondre à la

préoccupation des experts interrogés, pour qui une échelle en seulement trois niveaux ne serait pas assez précise pour donner des résultats adaptés.

Niveau 1	Pas de processus formellement défini
Niveau 2	Processus formellement défini et répétable
Niveau 3	Processus formalisé et piloté (basé sur la stratégie d'entreprise, avec des indicateurs clairement définis et suivis, et des objectifs fixés)
Niveau 4	Processus en amélioration continue

Tableau 6. Echelle générale de maturité pour la maturité des processus

Les niveaux de ce modèle de maturité des processus seront conçus comme étant cumulatifs : il sera nécessaire pour valider un niveau de maturité de répondre à toutes les exigences du niveau en question, mais également à toutes celles des niveaux inférieurs.

Cette échelle générale devra ensuite être déclinée pour chacun de nos cinq axes : production, qualité, logistique, maintenance et conception. En effet, elle représente la logique qui sous-tend la construction des différents niveaux de maturité pour chacun des axes. Cependant, il n'y aura pas, par la suite, d'agrégation entre les axes des dimensions. Il n'y aura pas de détermination d'un « niveau de maturité des processus » global.

Pour construire chacune des échelles de maturité précises, une étude de modèles a été menée pour chacun de ces cinq axes, afin d'identifier les points structurants permettant d'estimer la maturité des entreprises dessus. L'ensemble de ces sources est résumé dans le tableau (Tableau 7). Ces modèles ont ensuite été analysés et validés avec un expert de l'UIMM Lorraine, afin de construire les échelles de maturité pour chacun des axes. Ce travail est décrit dans les paragraphes suivants, en commençant par la construction des niveaux de maturité du processus de logistique.

Axes de la maturité des processus	Articles étudiés
Logistique	(Ayers, 2010; Lahti et al., 2009; J. Lee et al., 2017; Poirier, 1999; Poirier & Bauer, 2001; PRTM Management Consultants, 2005; Sternad et al., 2018)

Conception	(Banker et al., 2006; Bessant & Francis, 1997; J. Lee et al., 2017; Santos et al., 2017; Tzokas et al., 2004)
Production	(Kosieradzka, 2017; J. Lee et al., 2017; Trstenjak & Cosic, 2017; Wahab et al., 2013)
Maintenance	(Ahuja & Khamba, 2008; Maier et al., 2020; Poór et al., 2020; Sharma et al., 2012)
Qualité	(Dutta et al., 2021; Grabowska & Takala, 2018; Zonnenshain & Kenett, 2020)

Tableau 7. Littérature étudiée pour la construction des axes de la dimension "maturité des processus"

### 1) Logistique

Le processus de logistique est indispensable pour les entreprises industrielles, car il permet la mise à disposition des ressources nécessaires à la production. Il peut être défini ainsi :

**Définition** : Processus gérant, d'un côté, des activités de planifications (demande, distribution, achats, ...) et de l'autre, des activités opérationnelles en usine pour le stockage, la manutention interne des produits et l'asservissement de la production (Zheng et al., 2021)

En 1999, Charles Poirier propose des niveaux d'optimisation de la chaîne logistique d'une entreprise, reposant sur dix axes (Poirier, 1999) : pilote du processus, bénéfices du processus, orientation du processus, outils, domaine d'action, portée du processus, modèle, partenariats, formations, orientation. Ces dix axes sont développés sur quatre niveaux d'optimisation. Parmi ces axes, on peut souligner l'axe « Outils » qui met en avant l'importance de la mise en place de pratiques formalisées et maîtrisées, ainsi que des indicateurs de suivi. L'axe « orientation du processus » présente des pratiques plus ou moins matures pour la gestion des stocks et du réapprovisionnement, de la mise en place d'inventaires réguliers, à l'intégration de prévisions des consommations. Il insiste aussi sur la nécessité pour des processus matures de la capacité à être modifiés pour améliorer les performances. En 2001, Charles Poirier publie, avec Michael Bauer, un autre modèle de maturité de la chaîne logistique, cette dernière étant modifiée par le développement d'internet (Poirier & Bauer, 2001). Ce modèle présente huit axes : technologie de l'information, partenariats pour le développement de nouveaux produits, achats et approvisionnements, ventes et marketing, planification et production, logistique et gestion de l'inventaire, service client et gestion des commandes, ressources humaines. La

maturité est mesurée sur ces axes sur une échelle de cinq niveaux (même si les deux premiers niveaux partagent les mêmes critères de mesure). Les trois axes qui ont semblé les plus pertinents par rapport à notre modèle sont « achats et approvisionnements », « logistique et gestion de l'inventaire », et « service client et gestion des commandes ». Les autres axes ne convenaient pas car ils faisaient plutôt référence à la maturité technologique (comme « technologie de l'information »), ou alors ils correspondaient à des domaines non traités par notre modèle (« ventes et marketing », par exemple), ou encore ils coïncidaient à d'autres axes de la dimension de maturité des processus (comme « partenariats pour le développement de nouveaux produits », « planification et production » ou « ressources humaines »).

En 2005, le cabinet de conseil PRTM Management Consultants présente un modèle de maturité de la chaîne logistique visant à promouvoir un fonctionnement collaboratif inter-entreprise tout au long de la chaîne de valeur (PRTM Management Consultants, 2005). Ce modèle se construit sur quatre niveaux, d'une entreprise se concentrant sur ses processus internes, à un système de solutions informatiques partagées entre toutes les entreprises de la chaîne logistique. Les éléments opérationnels mesurés dans le modèle sont répartis en cinq familles : planification, approvisionnement, production, livraison, vision globale sur toute la chaîne logistique. On retrouve également ce modèle chez Lahti & al., qui insistent sur l'intégration d'éléments informatiques pour automatiser les échanges d'informations au long de la chaîne logistique (Lahti et al., 2009). Les familles de production et de planification étant plus proches de notre axe « Production », ils n'ont pas été retenus. Mais les aspects « approvisionnement » et « livraison » peuvent être rapprochés d'axes jugés pertinents du modèle précédent.

Dans son livre « *Supply Chain Project Management : A structured Collaborative and Measurable Approach* », James Ayers présente un modèle de maturité de la chaîne logistique (Ayers, 2010). Ce modèle est axé sur cinq tâches clés à maîtriser : planification stratégique de la *supply chain*, relations collaboratives en interne, partenariats pour la *supply chain*, gestion des informations de la *supply chain*, bénéfices financiers. Ces tâches sont déclinées sur cinq niveaux de maturité, du niveau 1 : « dysfonctionnel » au niveau 5 : « contribution stratégique à la chaîne logistique ». Les tâches retenues pour construire notre axe « logistique » sont la construction de partenariats avec les fournisseurs en amont et les clients en aval, et l'organisation collaborative au sein de l'entreprise. La gestion des informations de la chaîne logistique est également à prendre en compte, mais certains aspects correspondent plutôt à de la maturité technologique. L'aspect de planification stratégique est plutôt renvoyé à l'axe « production ». Quant à la tâche « bénéfices financiers », il a été jugé qu'elle ne rentrait pas dans le champ d'application de notre modèle.

Dans leur article, Sternad et al. décrivent le système logistique d'une entreprise industrielle, et précisent qu'il se divise en quatre parties : logistique des achats, logistique interne, logistique de distribution et logistique d'après-vente (Sternad et al., 2018). Ils développent ensuite quatre échelles de maturité sur la circulation des informations pour chacune de ces parties, ce qui souligne l'importance d'une bonne gestion de ces sujets. Néanmoins, les niveaux hauts de ces échelles nécessitant la mise en place de systèmes d'échanges automatiques des données, ces niveaux seront surtout intégrés à l'échelle de maturité de la dimension de maturité technologique. Parmi les pratiques présentées par Lee et al. dans leur sous-critère « gestion de la logistique », celle de « gestion de la demande de la matière première » peut être relié au sujet de l'approvisionnement, « gestion du stockage et de la libération des produits dans l'entrepôt » peut correspondre à la gestion de l'inventaire, et « gestion des commandes » peut être connecté à la relation avec les clients (J. Lee et al., 2017).

Trois aspects ont donc été retenus pour faire l'objet d'une échelle de maturité au sein de notre modèle : la gestion du stock et des réapprovisionnements, la logistique interne et l'approvisionnement de la production, et la gestion des relations avec les clients et fournisseurs. Ces échelles sont développées dans le Tableau 8, le Tableau 9 et le Tableau 10 respectivement :

Niveau 1	Les commandes de pièces ou matières premières sont déclenchées si des besoins sont constatés ; il n'y a pas de pratiques formalisées ou systématiques pour suivre l'état des stocks
Niveau 2	Des niveaux de stocks hauts et bas ont été définis ; les stocks sont suivis, et les commandes sont lancées lorsque les niveaux bas sont atteints
Niveau 3	Des indicateurs pour effectuer le suivi des stocks sont définis et suivis ; les prévisions de vente et de production sont intégrées au suivi des stocks pour adapter les commandes
Niveau 4	Le système de gestion de l'inventaire met en place des indicateurs pour suivre au plus près la consommation réelle pour optimiser les commandes et optimiser les stocks

*Tableau 8. Niveaux de maturité pour les pratiques de gestion du stock et des réapprovisionnements*

Niveau 1	L'alimentation des lignes de production a uniquement lieu lorsque des besoins sont constatés
Niveau 2	Pour déclencher le réapprovisionnement des lignes de production, des niveaux minimaux ont été définis, et mis en place
Niveau 3	Les niveaux fixés pour l'approvisionnement des lignes de production sont adaptés en fonction de la planification de la production
Niveau 4	L'alimentation des lignes de production est préparée en fonction de la planification de la production, puis adaptée en direct par rapport à la consommation réelle

Tableau 9. Niveaux de maturité pour les pratiques de logistique interne et approvisionnement de la production

Niveau 1	La communication avec les fournisseurs et les clients est uniquement en place à travers le passage des commandes, avec des relations très descendantes
Niveau 2	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle pour des sujets simples, comme les retards ou l'avancement des commandes
Niveau 3	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle, des pratiques pour chercher à améliorer le fonctionnement logistique sont en place avec les uns ou les autres
Niveau 4	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de façon à permettre une recherche commune d'optimisation du fonctionnement logistique

Tableau 10. Niveaux de maturité pour les pratiques de gestion des relations avec les clients et les fournisseurs

Afin de structurer les informations manipulées et formaliser les liens entre les axes et les pratiques, un modèle de données est présenté sous forme d'un diagramme de classes UML (Figure 7). Cette figure montre les classes liées à l'axe « Logistique ». Cet axe, faisant partie de la dimension « maturité des processus », est caractérisé par ses trois pratiques qui sont elles aussi évaluées en quatre niveaux présentés précédemment.

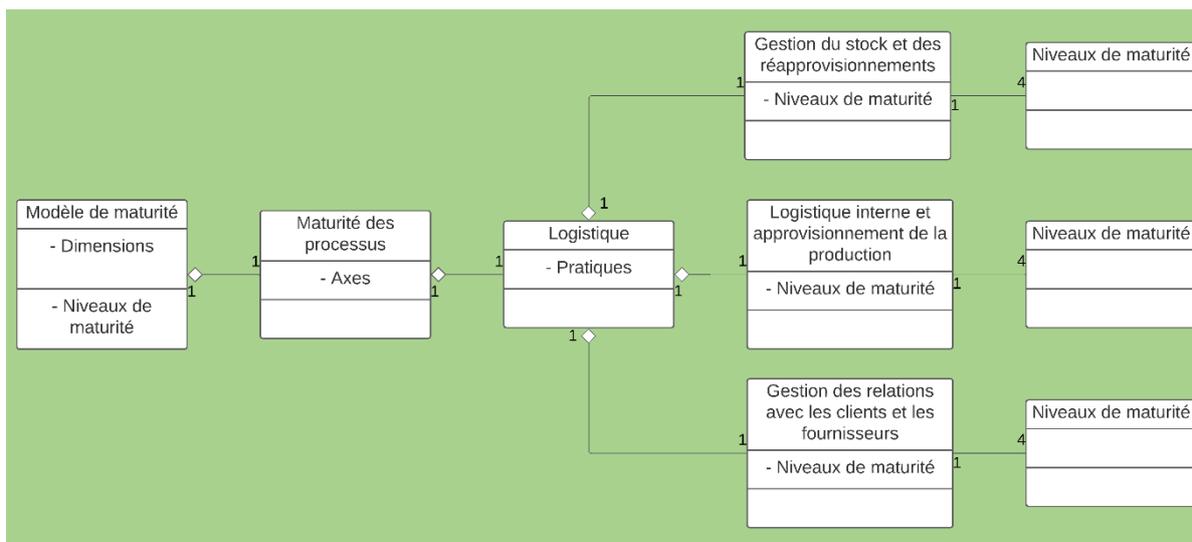


Figure 7. Structuration de l'axe "logistique" de la maturité des processus

En suivant la même démarche, nous avons construit les niveaux de maturité pour le processus de conception, ce qui est décrit dans la partie suivante.

## 2) Conception

L'activité de conception, que ce soit pour le développement de nouveaux produits, de nouveaux services ou de nouveaux processus, est importante pour les entreprises industrielles, leur permettant de continuer à créer les moyens de répondre aux besoins de leurs clients. La définition suivante concerne le développement de nouveaux produits, mais l'analogie est possible avec le développement de processus ou de services :

**Définition** : Le processus de développement de nouveaux produits inclue la conception, les essais et le prototypage d'un produit avant sa production et sa mise sur le marché ; ce processus inclue également la conceptualisation ainsi que l'éventuelle reconception de nouvelles versions du produit (Zheng et al., 2021)

Dans leur article, Banker et al. insistent sur l'importance de mettre en place un processus mature pour le développement de nouveaux produits (Banker et al., 2006), ce qui peut être étendu au développement de nouveaux processus. Ils sont rejoints sur ce point par (J. Lee et al., 2017) qui citent

la présence d'un processus de développement de nouveaux produits comme un point d'évaluation pour mesurer la maturité d'une entreprise. Banker et al. présentent les différentes phases d'un processus mature de conception de nouveaux produits (Initiation et concept, proposition du développement du produit, recherche et développement, développement de produit et conception du processus de fabrication, validation du design du produit et développement du processus de fabrication, production pilote et préparation de l'introduction du produit sur le marché), et les activités incluses dans chacune (par exemple, « spécifications préliminaires du produit » dans la phase « proposition du développement du produit »).

Une autre démarche mature de développement de produit est proposée par Tzokas et al., en six étapes (Tzokas et al., 2004) : génération d'idée, développement du concept, construction du dossier commercial, développement du produit, tests de marché, lancement sur le marché. Ils mettent également en avant des barrières et des évaluations pour passer d'une étape à la suivante, telles que le test du concept après la phase de développement de ce dernier, ou une évaluation fonctionnelle du produit après la phase de développement technique. Cela peut être rapproché des pratiques de conception de produit ou de processus proposé par Lee et al. qui incluent systématiquement des phases d'évaluation.

Santos et al. proposent en 2017 un modèle de développement de nouveau produit dans le contexte de l'Industrie 4.0 (Santos et al., 2017). Ce modèle est divisé en trois grandes phases, elles-mêmes divisées en étapes : un pré-développement (incluant l'analyse des exigences clients et la définition d'une liste des besoins et des ressources disponibles), le développement lui-même (avec la phase de conception puis la validation avec le prototypage) et enfin le post-développement (constitué de la production, de la maintenance et du recyclage du produit).

Dans leur article, Bessant et Francis présentent les caractéristiques de bonnes pratiques pour le développement de nouveaux produits (Bessant & Francis, 1997). Ils listent sept thématiques : un processus systématique pour le développement de nouveaux produits, l'implication rapide dans le processus de toutes les fonctions pertinentes de l'entreprise, la mise en place de tâches parallèles, l'utilisation de structures de gestion de projet appropriées, du travail en équipe interdisciplinaire, des outils de support avancés, et de l'amélioration continue grâce à de la gestion des connaissances. Pour chacune de ces thématiques, ils détaillent également les caractéristiques clés de ces thématiques, comme l'utilisation d'un modèle de processus intégrant des barrières d'évaluation (à l'instar de celui de (Tzokas et al., 2004)) pour la thématique « processus systématique pour le développement de nouveaux produits », ou la mise en place de pratiques pour conserver les connaissances acquises, via des audits post-projets par exemple, pour la thématique « amélioration continue grâce à la gestion des

connaissances ». La thématique « outils de supports avancés » étant plus proche de la dimension de maturité technologique, elle n’a pas été prise en compte.

A partir de ces différents modèles nous avons pu concevoir notre échelle de maturité pour la gestion du processus de conception, présentée dans le Tableau 11 :

Niveau 1	La conception de nouveaux produits ou processus ne fait pas l’objet d’un processus défini
Niveau 2	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini et appliqué pour chaque nouveau projet
Niveau 3	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive
Niveau 4	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive ; des pratiques de gestion des connaissances et de retours d’expérience permettent d’améliorer le processus à chaque projet

Tableau 11. Niveaux de maturité pour l'axe de conception

Le diagramme de classes UML suivant présente les classes liées à l’axe « Conception » (Figure 8). Cet axe est une des composantes de la dimension « maturité des processus ». Il est caractérisé par ses pratiques qui sont évaluées en quatre niveaux.

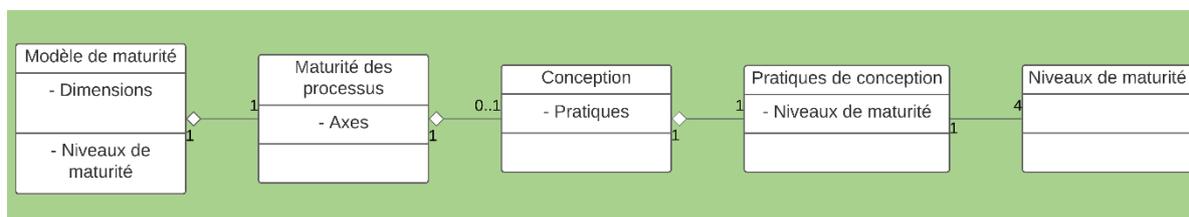


Figure 8. Structuration de l'axe "conception" de la maturité des processus

La partie suivante présente le développement des grilles de maturité pour le processus de production, qui a suivi la même méthode.

### 3) Production

La production est le processus au cœur de l'activité des entreprises industrielles. Dans notre cadre, nous avons décidé de définir la gestion de la production de la manière suivante :

**Définition** : La gestion de la production est le processus qui inclue à la fois la planification au sein de l'usine (par exemple, gestion de la charge des machines, répartition des lots) et le suivi et le contrôle de la production (Zheng et al., 2021)

Dans son article publié en 2017, Anna Kosieradzka propose une échelle générale décrivant des niveaux de maturité applicable à tous les processus de production industrielle (Kosieradzka, 2017). Elle présente cinq niveaux de maturité :

- Le niveau un, « processus de production réellement mis en place », où les objectifs sont atteints, mais les processus, non formalisés, ne sont pas répétables ou prévisibles, empêchant la mise en place de progrès du contrôle ;
- Le niveau deux, « processus de production gérés », où les objectifs de production sont atteints grâce à la mise en place de pratiques non formalisées, et les progrès sont suivis pour évaluer la cohérence avec les plans d'actions ;
- Le niveau trois, « processus de production définis », où les objectifs de production sont atteints au sein de processus formalisés conformément à la stratégie d'entreprise ;
- Le niveau quatre, « processus de production pilotés quantitativement », où des objectifs quantitatifs et qualitatifs, ainsi que des outils de contrôle de la performance sont définis et mis en place pour les processus et les opérations ;
- Le niveau cinq, « processus de production optimisés », où les processus font l'objet d'amélioration continue et adaptés à la fois à un environnement changeant et à la stratégie de l'entreprise.

Un autre modèle publié en 2013 met en avant les grandes dimensions du *lean manufacturing*, présenté ici comme une des formes les plus avancées du processus de production (Wahab et al., 2013). Ces grandes dimensions sont : processus et équipements de fabrication, planification et ordonnancement de la fabrication, système d'information visuel, développement de produits et technologies, gestion des effectifs, relations avec les fournisseurs, relations avec les clients. Parmi ces dimensions, certaines se retrouvent dans d'autres axes de notre modèle : « développement de produits » correspond plutôt à notre axe « conception », « relations avec les fournisseurs » et « relations avec les clients » est plutôt en lien avec notre axe « logistique ». En revanche, les dimensions « processus et équipements de

fabrication » et « planification et ordonnancement de la fabrication » sont des aspects qui nous semblent convenir à notre modèle.

Dans leur article, Trstenjak et Cosic insistent sur l'importance de la phase de planification de la production pour le bon déroulement de la phase de production elle-même, indiquant de fait qu'il s'agit de deux tâches distinctes (Trstenjak & Cosic, 2017). L'importance de la planification de la production est également visible chez (J. Lee et al., 2017), par la présence de deux pratiques correspondantes, « planification directrice de la production » et « développement détaillé du calendrier de la production ».

Deux sujets principaux ont émergé de notre revue de littérature : les pratiques de planification et le pilotage des étapes de la production. C'est pourquoi l'axe « production » est donc subdivisé en deux échelles de maturité distinctes les reprenant, présentées dans le Tableau 12 et le Tableau 13 :

Niveau 1	Les ordres de production sont lancés sans règles claires de priorisation, de manière « push » ; il n'y a pas de capacité de modification de la planification sur un cycle de production déjà entamé
Niveau 2	Des règles de priorisation formelles sont définies ; les ordres de fabrication sont lancés de manière « pull », permettant une certaine prise en compte de retards reportés
Niveau 3	Des règles de priorisation formelles sont définies ; les ordres de fabrication sont lancés de manière « pull », et l'avancement est suivi grâce à des indicateurs, permettant des ajustements rapides de la planification
Niveau 4	Les ordres de fabrication sont attribués de manière flexible, avec une prise en compte des spécificités des commandes et des caractéristiques des machines de production, afin d'optimiser les temps de fonctionnement et d'offrir une grande flexibilité

Tableau 12. Niveaux de maturité pour les pratiques de planification de la production

Niveau 1	La production est réalisée sans réel pilotage, et n'a pas d'objectif formel autre que « produire »
----------	--

Niveau 2	La production est pilotée en suivant des objectifs formels, prenant en compte les capacités de production du système ; des plans d'action correctifs sont lancés pour atteindre ces capacités si nécessaire
Niveau 3	Des indicateurs permettent le suivi en temps réel de l'avancement de la production, fournissant les données nécessaires au lancement rapide de plans d'actions
Niveau 4	Le système de production est suivi et piloté en temps réel, permettant de lancer les actions de correction dès que c'est utile

Tableau 13. Niveaux de maturité pour les pratiques de pilotage opérationnel et contrôle de la production

Pour mieux formaliser les liens entre les différents éléments, le diagramme de classes UML suivant présente les classes liées à l'axe « Production » (Figure 9). Cet axe est une des composantes de la dimension « maturité des processus ». Il est caractérisé par ses pratiques qui sont évaluées en quatre niveaux.

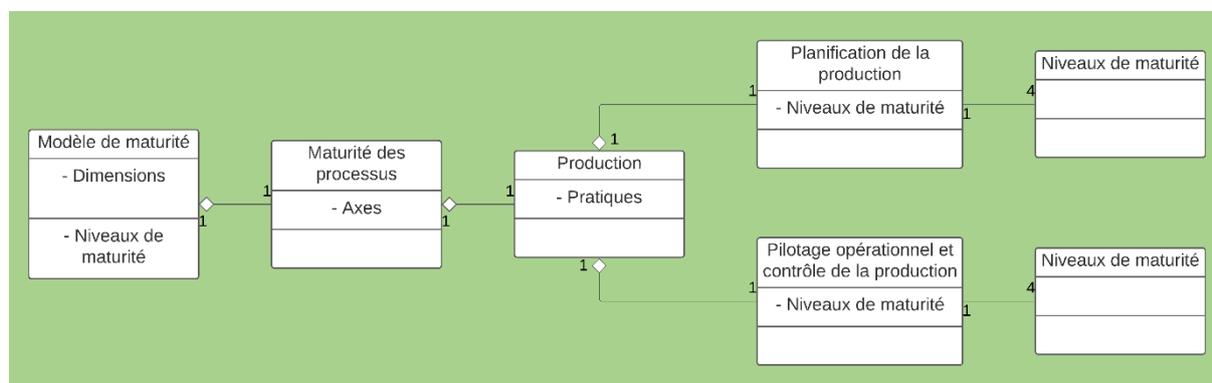


Figure 9. Structuration de l'axe "production" de la maturité des processus

La partie suivante présente les étapes, similaires, que nous avons suivi pour le développement des grilles de maturité pour le processus de maintenance.

#### 4) Maintenance

La maintenance a été identifiée comme un des processus-clés des entreprises industrielles. Elle peut être définie ainsi :

**Définition** : La maintenance est la combinaison de toutes les actions techniques, administratives et managériales durant le cycle de vie d'un article, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut remplir sa fonction (Maier et al., 2020).

Dans notre cadre, les articles en question désignent les machines de production des entreprises industrielles. Dans leur article, Poór et al. soulignent le développement de différents types de maintenance en parallèle des différentes « révolutions industrielles » : maintenance réactive avec la première, maintenance planifiée avec la deuxième, maintenance productive avec la troisième, et maintenance prédictive avec l'Industrie 4.0 (Poór et al., 2020). Ils précisent ensuite les différents types de maintenance, présentant différents formats pour une même famille (par exemple, la maintenance prédictive qui peut être soit basée sur des conditions fixées préalablement et suivies, soit basée sur des analyses statistiques). Enfin, ils proposent le niveau idéal de leur modèle de maintenance dans le cadre de l'Industrie 4.0, basé sur trois piliers :

- Matériel informatique (incluant des capteurs, des serveurs, des stations de contrôle, une structure réseau, des robots, des moyens de communication machine-à-machine et homme-à-machine,...) ;
- Systèmes logiciels (bases de données, jumeaux virtuels, ERP, canaux d'échanges de données, cyber-sécurité, analyse prédictive des données,...) ;
- Organisation et humain (connaissances et compétences, décentralisation, culture du changement, culture de l'innovation, apprentissage tout au long de la carrière,...).

Les deux premiers piliers sont plutôt assimilables à de la maturité technologique, mais mettent en avant les capacités nécessaires à la mise en place d'une maintenance prédictive.

Un autre modèle de maturité du système de maintenance se repose sur neuf catégories de pratiques : philosophie et système d'objectifs ; culture d'entreprise ; *Business model* et stratégie de service ; stratégie des actifs ; contrôle et budget ; structure organisationnelle ; organisation des processus ; gestion des connaissances ; données et technologies (Maier et al., 2020). Le niveau de maturité de ces catégories est mesuré sur cinq niveaux (statut initial, géré, défini, piloté quantitativement, en optimisation). Parmi ces dimensions, certaines ne rentrent pas dans le cadre de cette thèse, comme le *business model* ou le contrôle et budget, par exemple.

Un autre article liste et décrit six types d'organisation de maintenance industrielle (Sharma et al., 2012). Cette liste les classe également dans un ordre du type le moins mature au plus mature : entretien des pannes, maintenance préventive basée sur des intervalles de temps ; maintenance

préventive basée sur un volume d'usage ; maintenance préventive basée sur le suivi de l'état des machines et des conditions fixées préalablement ; maintenance prédictive basée sur le suivi d'indicateurs et le traitement automatique de données ; maintenance corrective entraînant une amélioration des performances des équipements.

Les types de maintenance les plus matures sont basés sur les principes de la *Total Productive Maintenance* (TPM). La maintenance productive totale peut être définie comme un processus structuré d'amélioration continue centré sur l'équipement qui vise à optimiser l'efficacité de la production en identifiant et en éliminant les pertes d'efficacité de l'équipement et de la production tout au long du cycle de vie du système de production grâce à la participation dans un esprit d'équipe des employés à tous les niveaux de la hiérarchie opérationnelle (Ahuja & Khamba, 2008). On peut voir que la progression des différents types de maintenance depuis la maintenance uniquement réactive vers une maintenance prédictive peut être assimilée à une échelle de maturité.

En faisant la liaison avec l'échelle générale de maturité des processus comme définie précédemment, on obtient l'échelle de maturité du processus de maintenance présentée dans le Tableau 14 :

Niveau 1	La maintenance est mise en place de manière corrective, uniquement en cas de défaillance de machines ou d'équipements
Niveau 2	Certaines pratiques de maintenance préventive ont été mises en place, planifiée de manière temporelle ou à la suite de la constatation de dégradation des équipements
Niveau 3	Une maintenance préventive est mise en place, planifiée grâce aux suivis d'indicateurs machines, à des conditions de déclenchement formalisées, et des contrôles réguliers + des pratiques basiques de TPM sont mises en place (ex : transmission de certaines tâches d'entretien basiques sont traitées directement par les opérateurs de production)
Niveau 4	Un processus de maintenance prédictive est mis en place, basé sur le suivi d'indicateurs et de paramètres machines permettant la détection à l'avance et le traitement préventif de futures défaillances potentielles + les pratiques avancées de TPM sont mises en place

Tableau 14. Niveaux de maturité pour l'axe de maintenance

Pour mieux établir les liens entre les différents éléments, le diagramme de classes UML suivant présente les classes liées à l'axe « Maintenance », axe de la dimension « maturité des processus » (Figure 10). Il est caractérisé par ses pratiques qui sont évaluées en quatre niveaux.

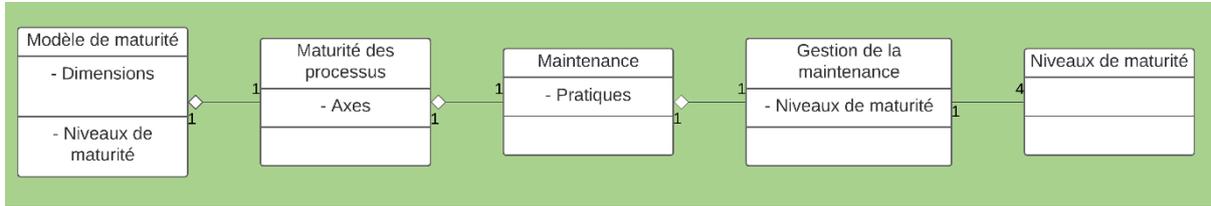


Figure 10. Structuration de l'axe "maintenance" de la maturité des processus

Pour finir, la partie suivante expose les étapes suivies pour construire les grilles de maturité pour le dernier axe de la maturité des processus, la qualité.

## 5) Qualité

Le dernier processus-clé des entreprises industrielles est la gestion de la qualité. Elle peut être définie ainsi :

**Définition** : La gestion de la qualité correspond aux activités de l'usine pour le contrôle de la qualité de la production ; à la fois en termes de produits (par exemple, les défauts des produits) et des processus (par exemple, les paramètres de production) (Zheng et al., 2021)

Un premier modèle de maturité sur la gestion de la qualité présente huit axes à mesurer (Grabowska & Takala, 2018) :

- Implication de la direction ;
- Implications des équipes, outils et méthodes de management ;
- Suivi des caractéristiques des processus de fabrication ;
- Relations avec les clients ;
- Relations avec les parties prenantes, incluant les fournisseurs ;
- Révision des effets de fonctionnement, processus de décision, de communication et amélioration continue ;
- Processus d'inspection, incluant la gestion des équipements d'inspection et de mesure ;
- Ressources matérielles pour la réalisation des processus.

Ces huit axes sont ensuite développés sur trois niveaux de maturité (processus immature, processus de maturité intermédiaire, processus mature).

Un autre article, traitant de la gestion de la qualité dans le cadre de l'Industrie 4.0, insiste sur l'importance de la qualité des données pour le processus qualité de l'entreprise (Zonnenshain & Kenett, 2020). Il propose ensuite une échelle de maturité sur l'utilisation de ces données dans le cadre du processus qualité, du niveau un représentant un processus où les données ne sont recherchées qu'au moment où on identifie leur utilité, au niveau cinq où l'identification, la collecte et le traitement de toutes les données nécessaires sont naturellement intégrés au processus qualité.

Dans leur modèle de maturité de la qualité, Dutta & al. relèvent 41 facteurs permettant de décrire la « culture de la qualité » d'une entreprise, qu'ils regroupent ensuite en huit facettes (Dutta et al., 2021) :

- Management de l'organisation ;
- Perception de l'environnement ;
- Attributs d'une organisation apprenante ;
- Attitude à l'égard du changement ;
- Attitude à l'égard de la qualité ;
- Leadership ;
- Investissement des équipes ;
- Alignement.

Chacun de ces facteurs est ensuite mesuré sur une échelle de cinq niveaux, du niveau 1 où il n'y a pas de processus qualité clairement défini, et si des pratiques sont mises en place, leur succès dépend d'efforts individuels, jusqu'au niveau 5 où le processus fait l'objet d'une démarche d'amélioration continue, et il y a une recherche d'anticipations des futures exigences.

Trois sujets principaux ont été retirés de ces textes. Le premier est l'implication des équipes et du personnel dans le processus qualité. On retrouve directement ce sujet dans le modèle de Grabowska et Takala, comme un axe à part, mais aussi dans certaines pratiques de celui de Dutta et al., comme par exemple « perception de la responsabilité pour la qualité » au sein de la facette « attitude à l'égard de la qualité », ou bien la facette « investissement des équipes ». Le deuxième sujet retenu est la prise en compte des exigences et attentes clients dans le processus qualité. Cet aspect se retrouve dans l'axe « relation avec les clients » de Grabowska et Takala, ainsi que dans la facette « perception de l'environnement » du modèle de Dutta et al., à travers des pratiques comme « Collecte de retours des clients », « Agrégation des retours des clients », ou « Actions prises à la suite des retours des clients ». Enfin, le pilotage opérationnel du processus qualité a été retenu comme troisième aspect à prendre

en compte. Ce sujet est présent chez Grabowska et Takala, dans les axes « révision des effets de fonctionnement, processus de décision, de communication et amélioration continue », « Processus d'inspection, incluant la gestion des équipements d'inspection et de mesure », et « ressources matérielles pour la réalisation des processus » notamment. C'est ici qu'on peut retrouver la gestion et l'utilisation des données liées à la qualité, et donc cet aspect recoupe les recommandations de Zonnenshain et Kennett. Certaines pratiques tirées du modèle de Dutta et al. peuvent se retrouver ici, comme « suivi des progrès », « mesure des performances », ou « processus de conduite de projet » de la facette « management de l'organisation » par exemple.

A travers notre revue de la littérature, nous avons relevé trois aspects du sujet de la maturité des processus de qualité : le pilotage des tâches de contrôle de la qualité ; l'intégration des attentes des clients ; la manière d'impliquer l'ensemble de l'entreprise pour la qualité. Le travail de synthèse a donné les niveaux de maturité pour ces trois aspects.

Le Tableau 15 présente l'échelle de maturité de la pratique « Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité » :

Niveau 1	La fonction qualité n'est pas clairement définie au sein de l'entreprise, ne renvoie pas à des responsabilités clairement établies
Niveau 2	La fonction qualité est définie formellement, et est associée à un ou des responsables chargés de son application
Niveau 3	La fonction qualité est associée à des objectifs, des indicateurs et des mesures clairement définis ; certaines tâches simples du processus qualité sont confiées à d'autres personnes que les membres de l'équipe « qualité » (des opérateurs de production)
Niveau 4	Le suivi de la qualité est toujours confié à un ou des responsables, mais tout le personnel est impliqué dans l'application du processus qualité

Tableau 15. Niveaux de maturité pour les pratiques d'implication des équipes et du personnel dans le processus qualité

Le Tableau 16 présente l'échelle de maturité de la pratique « Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité » :

Niveau 1	L'application des spécifications des clients et la gestion des retours se fait sur le tas, sans processus formellement défini
Niveau 2	Un processus formel a été établi pour la prise en compte des spécifications des clients et pour la gestion des retours

Niveau 3	Le processus de gestion des exigences clients intègre des indicateurs tels que la satisfaction des clients ou le suivi des écarts aux spécifications ; ces indicateurs permettent la mise en place d'objectifs précis et de plans d'actions correctifs
Niveau 4	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations, chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison

Tableau 16. Niveaux de maturité pour les pratiques de prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité

Le Tableau 17 présente l'échelle de maturité de la pratique « Pilotage opérationnel du processus qualité » :

Niveau 1	Il n'y a pas de gestion formalisée de la qualité ; les contrôles qualité de la production ne sont pas conduits de manière systématique
Niveau 2	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé ; une démarche de contrôle qualité postérieur à la production est systématique, et des plans d'actions correctifs sont mis en place si nécessaire
Niveau 3	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé ; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production, et permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates
Niveau 4	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé ; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production, et permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates ; des actions de prévention de défauts potentiels peuvent être identifiées et mises en place au préalable

Tableau 17. Niveaux de maturité pour les pratiques de pilotage opérationnel du processus qualité

Le diagramme de classes UML suivant présente les liens entre les classes liées à l'axe « Qualité » (Figure 11). Cet axe de la dimension « maturité des processus » est caractérisé par ses pratiques, évaluées en quatre niveaux.

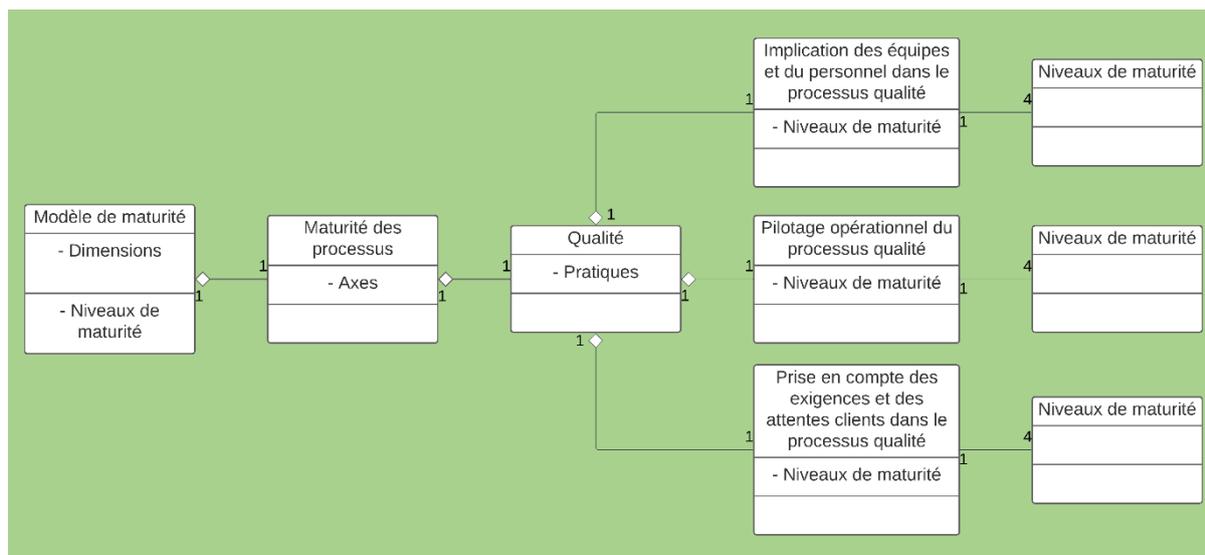


Figure 11. Structuration de l'axe "qualité" de la maturité des processus

Nous avons construit les grilles de maturité de l'axe qualité en étudiant la littérature sur le sujet et en traitant les résultats avec un expert. Ainsi, l'ensemble des grilles de maturité a été établi pour la dimension de maturité des processus. Le paragraphe suivant décrit la démarche suivie pour le développement des grilles de maturité pour la dimension de maturité technologique.

## b. Maturité technologique

Comme pour la maturité des processus, la dimension de maturité technologique a été approuvée par les experts, mais ses axes ont été remis en cause. Il était donc nécessaire d'établir l'ensemble des axes à traiter dans cette dimension. Les grands processus retenus pour la maturité des processus (gestion de la production, gestion de la qualité, gestion de la logistique, gestion de la maintenance et conception de produits/processus) étant également des axes faisant partie de la première sélection d'axes, il a été décidé de sélectionner les mêmes pour la dimension de maturité technologique.

L'échelle générale des niveaux de maturité, inspirée par (Qin J. et al., 2016) et (Danjou et al., 2017) a été conservée (Tableau 18) :

Niveau 1	Technologies traditionnelles non communicantes
Niveau 2	Technologies numériques communicantes mais non connectées

Niveau 3	Technologies numériques communicantes et connectées à un réseau d'entreprise
Niveau 4	Technologies numériques connectées et intelligentes

Tableau 18. Echelle générale de maturité pour la maturité technologique

A l'instar de la maturité des processus, les niveaux pour la maturité technologique seront conçus comme étant cumulatifs. Cette échelle générale devra ensuite être déclinée pour chacun de nos cinq axes : production, qualité, logistique, maintenance et conception. Pour réaliser ce travail, une revue de littérature traitant des technologies concernées a été menée, afin d'identifier les points structurants permettant d'estimer la maturité des entreprises. L'ensemble de ces sources est résumé dans le Tableau 19.

Considérant que les technologies ne sont qu'un moyen pour réaliser des tâches, il a été décidé de se concentrer sur les fonctions issues des technologies plutôt que sur les technologies elles-mêmes pour la constitution de ces échelles. Par exemple, plutôt que d'interroger sur la présence ou non d'éléments technologiques spécifiques comme des puces RFID pour l'identification des pièces, on interrogera plutôt pour savoir si le système technologique de l'entreprise permet l'identification autonome des pièces, car cela peut également être réalisé par d'autres moyens (codes-barres, gravures laser sur pièce, ...). De plus, certaines solutions technologiques pourraient ne pas pouvoir s'appliquer à des entreprises ou domaines particuliers, ce qui réduirait le champ d'application de notre outil. Enfin, cela permettrait à nos échelles de maturité d'être plus facilement adaptables à l'avenir, dans le cas d'apparitions de nouvelles technologies de production, qui ne seraient donc pas encore prises en compte dans notre modèle actuel. Ces éléments tirés de la littérature ont ensuite été confrontés avec un expert de l'UIMM Lorraine, permettant la construction des échelles de maturité pour chacun des axes.

Axes de la maturité technologique	Articles étudiés
Logistique	(Blanco-Novoa et al., 2018; Durão et al., 2017; Garay-Rondero et al., 2020; Ghadimi et al., 2019; Ghobakhloo, 2018; Hofmann & Rüscher, 2017; Ivanov et al., 2019; Kamble et al., 2018; Kumar et al., 2018; C. K. M. Lee et al., 2018; Lolli et al., 2019; Nagy et al., 2018; Savastano et al.,

	2019; Srai & Lorentz, 2019; J. O. Strandhagen et al., 2017; J. W. Strandhagen et al., 2017; Wan et al., 2016; Zheng et al., 2021)
Conception	(Ang et al., 2017; Bressanelli et al., 2018; T. Chen & Lin, 2017; Y. Chen, 2017; Chong et al., 2018; Dalenogare et al., 2018; Ghobakhloo, 2018; Miranda et al., 2019; Qi & Tao, 2018; Rao & Prasad, 2018; Tao & Qi, 2019; Zheng et al., 2021; Zhong et al., 2017)
Production	(Aheleroff et al., 2019; Ang et al., 2017; Blanco-Novoa et al., 2018; T. Chen & Lin, 2017; Y. Chen, 2017; Cohen et al., 2019; Fatorachian & Kazemi, 2018; Ghobakhloo, 2018; Kim et al., 2018; Longo et al., 2019; Qi & Tao, 2018; Rojas & Rauch, 2019; Rossit et al., 2019; Shafiq et al., 2015; Tao & Qi, 2019; Zheng et al., 2021; Zhong et al., 2017)
Maintenance	(Ang et al., 2017; Ansari et al., 2019; Blanco-Novoa et al., 2018; Caggiano, 2018; Canizo et al., 2019; Y. Chen, 2017; Illa & Padhi, 2018; Li et al., 2017; Nagy et al., 2018; Qi & Tao, 2018; Roy et al., 2016; Tao & Qi, 2019; Turner et al., 2019; Wan et al., 2018; Zheng et al., 2021)
Qualité	(Avalle et al., 2019; Blanco-Novoa et al., 2018; Carvajal Soto et al., 2019; Ferraguti et al., 2019; Illa & Padhi, 2018; Kucukoglu et al., 2018; Muñoz et al., 2019; Nagy et al., 2018; Peres et al., 2019; Tao & Qi, 2019; Zheng et al., 2021)

Tableau 19. Littérature étudiée pour la construction des axes de la dimension "maturité technologique"

Dans leur article de 2021, Zheng et al. se sont intéressés aux applications des technologies de l'Industrie 4.0 dans un contexte industriel, en fonction des processus opérationnels de fabrication (Zheng et al., 2021). Ces processus opérationnels sont au nombre de dix :

- Développement de nouveaux produits ;
- Configuration de la chaîne d'approvisionnement ;
- Planification de la chaîne d'approvisionnement intégrée ;
- Logistique interne ;
- Contrôle et planification de la production ;
- Gestion de l'énergie ;
- Gestion de la qualité ;
- Gestion de la maintenance ;
- Gestion de la relation client ;
- Gestion de l'après-vente.

Ces processus sont ensuite croisés avec un ensemble de technologies considérées comme indispensables pour le déploiement de l'Industrie 4.0 pour identifier quelles sont les fonctions que remplissent ces technologies au sein de ces différents processus. Les technologies retenues sont :

- Les Systèmes Cyber-Physiques ;
- L'Internet des Objets ;
- Les *Big Data* et les logiciels d'analyse des données ;
- Le *cloud* ;
- L'Intelligence Artificielle ;
- La *blockchain* ;
- Les logiciels de simulations et de modélisation ;
- L'automatisation des machines de production et les robots ;
- Les technologies de visualisation comme la réalité augmentée et la réalité virtuelle ;
- La fabrication additive.

Parmi les processus opérationnels présentés, plusieurs correspondent aux axes que nous avons sélectionné pour notre dimension : gestion de la qualité, gestion de la maintenance, contrôle et planification de la production et développement de nouveaux produits. De plus, trois de ces processus concernent des éléments de logistique, qui est notre cinquième axe : configuration de la chaîne d'approvisionnement, planification de la chaîne d'approvisionnement intégrée et logistique interne. Nous avons alors décidé de les réunir pour correspondre à notre axe logistique. Les derniers axes restants (à savoir gestion de l'énergie, gestion de la relation client et gestion de l'après-vente) ont été considérés comme hors de notre cadre d'étude et donc mis de côté.

Une fois ces fonctions analysées, il a été considéré qu'elles correspondaient plutôt aux niveaux 3 ou 4 de notre échelle générale. Par exemple, pour le processus de gestion de la maintenance, la fonction

« diagnostic et analyse de la maintenance », basée sur les technologies du *Big Data* et de l'IA, correspond à notre niveau 4, « Technologies numériques connectées et intelligentes ». Pour développer les niveaux inférieurs, indispensables pour pouvoir s'adresser aux entreprises moins avancées sur les sujets technologiques, un travail a été mené avec un expert industriel pour décliner les fonctions identifiées vers les niveaux les plus bas.

De même que nous avons présenté le développement des différentes grilles de maturité pour la dimension de maturité des processus, les paragraphes suivants décrivent la construction de celles de la dimension de maturité technologique. Pour commencer, nous détaillerons les étapes de développement de celles de l'axe « logistique ».

### 1) Logistique

La combinaison de l'IoT, du *Big Data*, du *cloud*, de l'IA et potentiellement des technologies de visualisation peuvent servir à numériser les fonctions d'achat et de gestion des ressources, voire de les associer à des technologies intelligentes pour les optimiser (Srai & Lorentz, 2019). Les technologies de l'IoT, peuvent contribuer à l'identification et au suivi en temps réel des pièces et produits, facilitant la gestion de l'inventaire (Wan et al., 2016). Hofmann et Rüsç donnent l'exemple d'étiquettes numériques d'auto-identification et d'outils de scan manipulés par les opérateurs ou de portails de contrôle, accélérant ces tâches et permettant de gagner du temps et limiter le gâchis de matières premières (Hofmann & Rüsç, 2017). Une autre utilisation de ce type de technologies peut permettre l'automatisation des transports de pièces ou produits, grâce à des Véhicules à Guidage Automatique (VGA, souvent nommés AGV pour *Automatic Guided Vehicle*), ou de la gestion du magasin (J. O. Strandhagen et al., 2017).

Kamble et al. proposent une autre utilisation du *Big Data*, traitant les données pour anticiper les futures demandes des clients, fournissant des informations pour alimenter la planification de la production et les achats de la logistique (Kamble et al., 2018). Le *Big Data* peut également, d'après Hofmann et Rüsç, être associée avec les technologies de l'IoT pour mettre en place un suivi précis des pièces, produits et matériaux (Hofmann & Rüsç, 2017). Ils proposent également de combiner les CPS avec le *Big Data* pour automatiser la collecte de données en temps réel et leur traitement automatique, pour optimiser la transmission et l'exploitation des données logistiques. Nagy et al. sont du même avis et soulignent que cette combinaison entraîne en général une meilleure coopération avec les fournisseurs et les clients (Nagy et al., 2018). Les données issues de ces processus peuvent également servir à établir des estimations de la demande en temps réel, voire des prévisions. Afin de stocker toutes ces informations et de les rendre disponibles à tous les acteurs concernés au sein de

l'entreprise, voire à ceux des entreprises partenaires, Garay-Rondero et al. suggèrent d'exploiter les possibilités offertes par la technologie *cloud* (Garay-Rondero et al., 2020). Les données ainsi disponibles facilitent la communication et donc le processus de prise de décision pour la logistique.

Une autre possibilité offerte par le *cloud* est la mise en place de plateformes collaboratives pour la coordination des ressources et des commandes entre les différents acteurs de la chaîne logistique, des fournisseurs aux clients (Rao & Prasad, 2018; J. W. Strandhagen et al., 2017). Pour Garay-Rondero et al., la combinaison de l'IoT, le *Big Data* et le *cloud* peut être la base pour une amélioration de l'automatisation de la chaîne logistique (Garay-Rondero et al., 2020). Strandhagen et al. proposent d'utiliser le *Big Data* pour l'optimisation de la distribution et la livraison des produits (J. O. Strandhagen et al., 2017). Dans le cas d'entreprises devant gérer une grande diversité de pièces et produits, Lolli et al. suggèrent d'utiliser l'IA et du *Machine Learning* pour optimiser la gestion de l'inventaire (Lolli et al., 2019). Lee et al. proposent d'utiliser l'IA pour optimiser la gestion des commandes (C. K. M. Lee et al., 2018). De leur côté, Hofmann et Rüsçh considèrent que, associée à des logiciels de simulation, l'IA peut servir à optimiser les flux physiques au sein des ateliers de production ou des flux de livraison (Hofmann & Rüsçh, 2017). Pour aider les opérateurs de logistique lors de la préparation des commandes ou de la gestion du magasin, Strandhagen et al. ou Blanco-Novoa et al. proposent la mise en place de lunettes en AR pour les guider dans leurs tâches (Blanco-Novoa et al., 2018; J. W. Strandhagen et al., 2017).

Après avoir mené cette revue de littérature, nous avons relevé différentes fonctions technologiques pour le processus de logistique : le guidage des opérateurs logistique, les technologies pour le transport des pièces, celles pour la gestion du magasin, celles pour le suivi des pièces, le traitement des données de logistique, la gestion des commandes des clients et enfin, la gestion des commandes auprès des fournisseurs. Nous avons ensuite retravaillé les résultats avec l'expert industriel pour développer les échelles de maturité suivantes :

Guidage des opérateurs logistiques (Tableau 20) :

Niveau 1	Organisation non informatisée pour la gestion du guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes
Niveau 2	Guidage des opérateurs logistique pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique non connecté
Niveau 3	Guidage des opérateurs logistique pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique connecté

Niveau 4	Gestion de la préparation des commandes piloté automatiquement et soutien à la préparation des pièces et commandes par réalité augmentée
----------	--

Tableau 20. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques de guidage des opérateurs logistiques

Technologies pour le transport des pièces/produits (Tableau 21) :

Niveau 1	Utilisation de technologies non numériques (fenwick, transpalette,...)
Niveau 2	[Pas de niveau 2]
Niveau 3	Transports internes autonomes dans leurs déplacements, alimentés manuellement
Niveau 4	Automatisation des transports internes, de l'alimentation des lignes et de la manutention

Tableau 21. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour le transport des pièces et produits

Technologies pour la gestion du magasin (Tableau 22) :

Niveau 1	Pas de technologies numériques pour la gestion du magasin
Niveau 2	Utilisation de technologies numériques pour la gestion du magasin, mais manutention manuelle des pièces et matériaux
Niveau 3	Systèmes de rangements autonomes du magasin, avec échanges manuels entre ceux-ci et les technologies de transports
Niveau 4	Systèmes de rangements autonomes du magasin capables d'interagir automatiquement avec les technologies de transports

Tableau 22. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la gestion du magasin

Technologies de suivi des pièces et matériaux (Tableau 23) :

Niveau 1	Pas de technologies numériques dédiées au suivi des pièces et matériaux
Niveau 2	Identification et suivi d'éléments par recherche de référence sur support informatique, mise à jour manuelle des données
Niveau 3	Identification et suivi des éléments par scan manuel et mise à jour automatique des données
Niveau 4	Identification et suivi autonome des éléments par scan automatique et mise à jour automatique des données

Tableau 23. Niveaux de maturité pour les fonctions technologies pour le suivi des pièces et matériaux

Suivi et traitement des données de logistique (Tableau 24) :

Niveau 1	Collecte et suivi manuels des données de logistique
Niveau 2	Réception et intégration des données de logistique, incluant le plan des stockages de matériaux, sur support numérique
Niveau 3	Collecte automatique des données et simulation des flux de matériaux
Niveau 4	Simulation des flux de matériaux en temps réel et guidage automatique pour rangement et allocation des matériaux

Tableau 24. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques de suivi et traitement des données de logistique

Gestion des commandes fournisseurs (Tableau 25) :

Niveau 1	Planification manuelle des commandes
Niveau 2	Proposition automatique de planification de l'expédition des commandes en fonction du niveau de stock
Niveau 3	Proposition et transmission automatique de planification de l'expédition des commandes (système d'envoi automatique des commandes après validation)
Niveau 4	Proposition et transmission automatique des planifications de l'expédition des commandes, avec mise à jour en temps réel

Tableau 25. Niveaux de maturité pour les fonctions logistiques pour la gestion des commandes fournisseurs

Gestion des commandes clients (Tableau 26) :

Niveau 1	Gestion manuelle des commandes clients ; pas de pratiques de prévision des commandes clients
Niveau 2	Evaluation et prévision de la demande par traitement manuel de données numériques
Niveau 3	Evaluation et prévisions avancées de la demande
Niveau 4	Evaluation prédictive de la demande, mise à jour en temps réel

Tableau 26. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la gestion des commandes clients

Afin de structurer les informations de ce sujet et formaliser les liens entre les axes et les pratiques, nous présentons le modèle de données sous forme d'un diagramme de classes UML (Figure 12). Cette figure montre les classes liées à l'axe « Logistique ». Cet axe, faisant partie de la dimension « maturité

technologique », est caractérisé par ses sept fonctions qui sont évaluées en quatre niveaux, présentés précédemment.

La partie suivante présente la démarche suivie pour construire les grilles de maturité pour l'axe de conception de la maturité technologique.

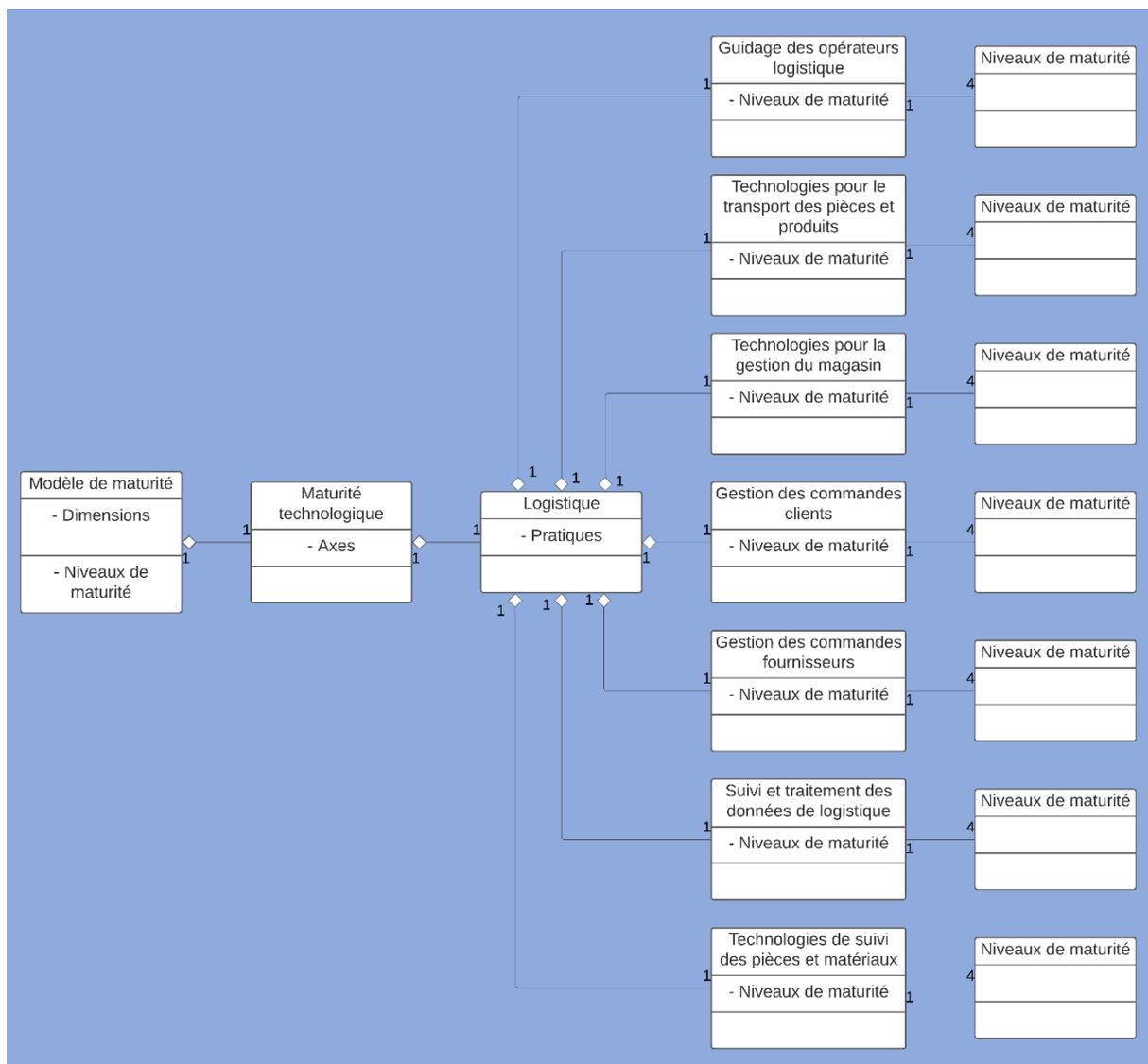


Figure 12. Structuration de l'axe "logistique" de la maturité technologique

## 2) Conception

Les fonctions décrites ci-dessous sont principalement présentées dans le prisme du développement de nouveaux produits, telles qu'elles sont présentées dans les publications dont elles sont issues. Néanmoins, elles sont généralement transposables pour le développement de nouveaux processus.

Les technologies de l'Industrie 4.0 permettent la mise en place de pratiques de conception partagée en temps réel. En effet, Ang et al. comme Rao et Prasad indiquent que l'utilisation des systèmes *cloud* permet la mise en place d'un environnement numérique en ligne dans lequel les équipes de conception peuvent travailler ensemble à distance en temps réel (Ang et al., 2017; Rao & Prasad, 2018). Dans leur article, Miranda et al. présentent une utilisation des technologies des CPS, via une intégration de ces dernières dans les produits de l'entreprise, lui permettant de développer et de proposer des produits intelligents à leurs clients (Miranda et al., 2019). Les articles de Chen et al., de Tao et Qi ou de Bressanelli et al. proposent une utilisation des technologies de l'IoT pour la collecte d'informations lors de l'utilisation des produits par les utilisateurs. Ainsi, ces données pourront être exploitées pour alimenter les phases de conception (Bressanelli et al., 2018; B. Chen et al., 2017; Tao & Qi, 2019). Les informations ainsi collectées pourraient d'ailleurs être utiles pour une autre fonction, à savoir le traitement des données par les technologies de Big Data. En effet, d'après plusieurs chercheurs, ces dernières, capables de traiter de grands volumes de données, permettraient d'identifier de nouveaux besoins, des optimisations de conception ou des améliorations potentielles de produits existants (B. Chen et al., 2017; Dalenogare et al., 2018; Qi & Tao, 2018; Tao & Qi, 2019).

Les logiciels de simulation et de modélisation offrent plusieurs fonctions pour le développement de nouveaux produits. L'utilisation de logiciels de modélisation permet la création de jumeaux numériques des produits en conception, facilitant des étapes de conception itérative (Qi & Tao, 2018). Les simulations numériques permettent également de réaliser des tests techniques sur ces prototypes virtuels, réduisant les besoins de tests réels plus coûteux (Ang et al., 2017; Miranda et al., 2019). Avec l'utilisation de réalité augmentée, les phases d'études du design des produits peuvent être menées de façon plus intuitive, avec une visualisation directe des pièces ou produits finis (Zhong et al., 2017). Avec la fabrication additive, de nouvelles possibilités de conception sont offertes aux équipes car elle permet des formes impossibles à réaliser avec les techniques de fabrication traditionnelles (Ang et al., 2017; B. Chen et al., 2017). De plus, cette technologie peut accélérer les phases de prototypage grâce à une réalisation de prototypes plus simple et plus rapide (Chong et al., 2018; Ghobakhloo, 2018).

Nous avons relevé, au travers de notre étude de la littérature, plusieurs fonctions technologiques pour les étapes de conception : le prototypage, la réalisation de tests sur les prototypes, la modélisation des produits, la capacité de conception collective, l'acquisition de données utilisateurs ou la virtualisation de pièces physiques. Le travail de synthèse de ces éléments et de développement avec l'expert industriel a donné les échelles de maturité suivantes :

Réalisation des tests sur prototypes (Tableau 27) :

Niveau 1	Tests mécaniques et mesure des produits sur pièces physiques
----------	--

Niveau 2	Capacité à réaliser des tests virtuels sur des prototypes numériques de pièces simples
Niveau 3	Prototypage virtuel de sous-systèmes avec simulations de tests
Niveau 4	Prototypage virtuel de systèmes complexes avec simulations de tests

Tableau 27. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la réalisation de tests sur les prototypes

Représentation/modélisation des pièces et produits (Tableau 28) :

Niveau 1	Dessin de pièces/produits sur papier
Niveau 2	Représentations numériques des pièces/produits (2D ou 3D)
Niveau 3	Représentations numériques des pièces/produits (2D ou 3D) dans une plateforme collaborative
Niveau 4	Utilisation de technologies de visualisation pour la représentation des pièces/produits en 3D dans l'espace

Tableau 28. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la représentation et modélisation des pièces et produits

Capacité de conception collective (Tableau 29) :

Niveau 1	Le système technologique de l'entreprise ne permet d'impliquer des acteurs que s'ils sont physiquement dans le même lieu
Niveau 2	Le système technologique de l'entreprise permet l'échange de fichiers numériques, qui ne sont pas disponibles en ligne
Niveau 3	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification à distance, mais pas de manière simultanée par plusieurs utilisateurs
Niveau 4	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification des fichiers à distance, même en simultané avec d'autres utilisateurs

Tableau 29. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la capacité de conception collective

Technologies dédiées au prototypage (Tableau 30) :

Niveau 1	Réalisation de prototypes grâce à l'utilisation de machines traditionnelles non numériques
Niveau 2	Réalisation de prototypes grâce à l'utilisation de machines numériques
Niveau 3	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication additive
Niveau 4	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication hybride

Tableau 30. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques dédiées au prototypage

Virtualisation de pièces physiques (Tableau 31) :

Niveau 1	Réalisation de profilage de pièces en 2D
Niveau 2	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par contact
Niveau 3	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique manuel
Niveau 4	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique autonome

Tableau 31. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques de virtualisation de pièces physiques

Acquisition de données utilisateurs pour la conception (Tableau 32) :

Niveau 1	Pour obtenir des données d'utilisation, mise en place de tests utilisateurs sans technologies numériques dédiées
Niveau 2	Utilisation de supports numériques pour la captation des données lors des tests utilisateurs
Niveau 3	Collecte de données d'utilisation directement à partir des produits pour l'amélioration de la conception
Niveau 4	Utilisation de Big Data et/ou d'IA pour le traitement et analyse des données pour l'amélioration de la conception

Tableau 32. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour l'acquisition des données utilisateurs

Pour expliciter la structuration des informations et formaliser les liens entre les axes et les pratiques, nous présentons un diagramme de classes UML exposant le modèle de données (Figure 13). Cette figure montre les classes liées à l'axe « Logistique », composante de la dimension « maturité

technologique ». Cet axe est caractérisé par six fonctions, évaluées en quatre niveaux, comme présenté précédemment.

La partie suivante exposera le processus suivi pour établir les grilles de maturité pour l'axe de production de la maturité technologique.

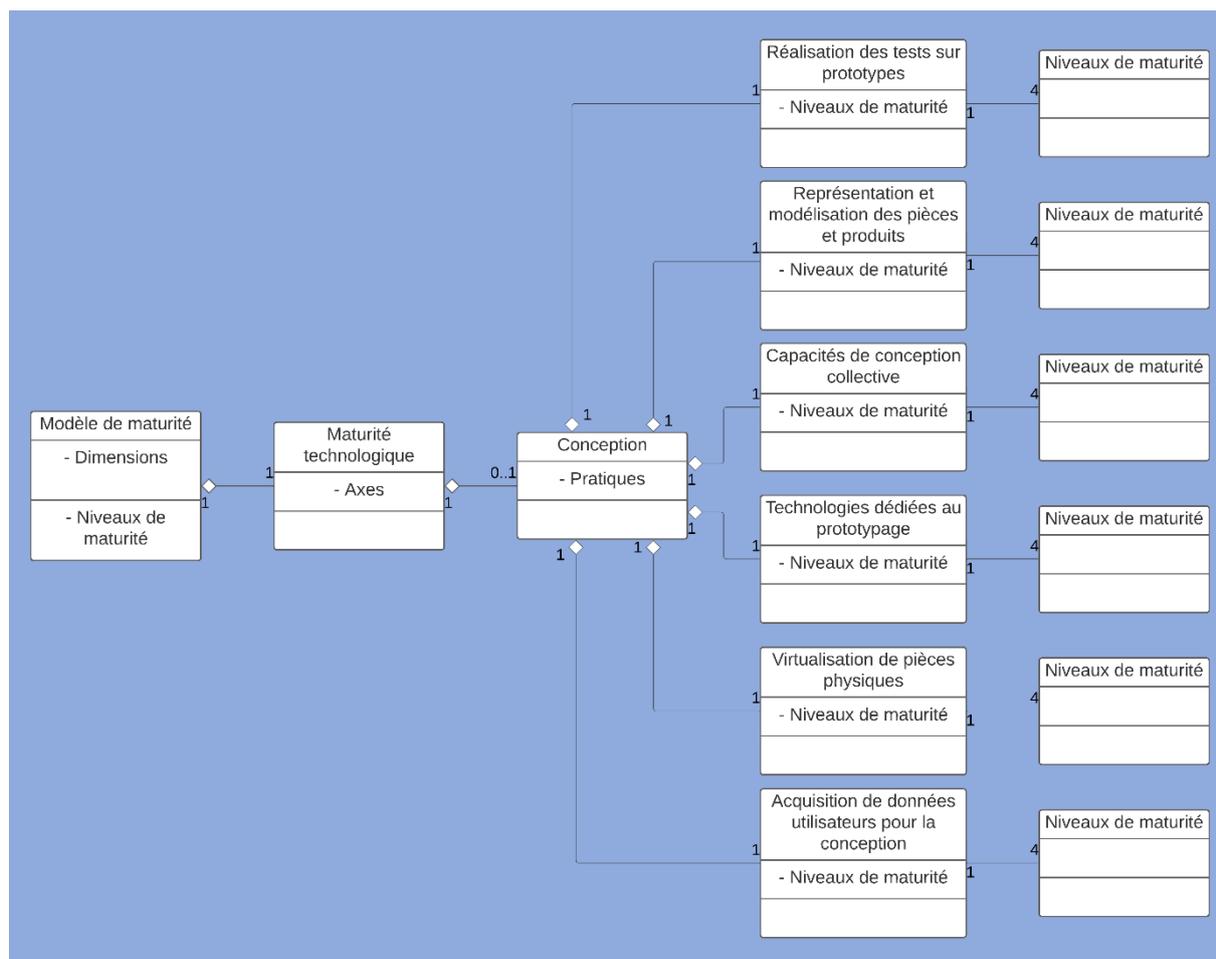


Figure 13. Structuration de l'axe "conception" de la maturité technologique

### 3) Production

La combinaison des CPS et de l'IoT sont les constituants essentiels pour la mise en place de processus de fabrication intelligent, car ils permettent de numériser les processus, les machines, les produits ou encore les opérateurs (B. Chen et al., 2017; Ghobakhloo, 2018). Rojas et Rauch soulignent également la capacité des CPS à permettre le contrôle à distance des machines de production grâce à leur connectivité (Rojas & Rauch, 2019). Les données fournies par ces CPS peuvent également être

exploitées pour mettre en place et ensuite tenir à jour la planification de la production (Rossit et al., 2019). D'autres auteurs, comme Aheleroff et al., considèrent que la mise en place de ce type de technologie permet une grande capacité pour une personnalisation de masse au sein de la production (Aheleroff et al., 2019). Les CPS permettent également la création de jumeaux numériques des machines de production, facilitant le suivi et le contrôle du processus de production (Longo et al., 2019). Dans la même veine, Shafiq et al. proposent une méthode de formalisation des données issues des CPS et de l'IoT via des logiciels de simulation numérique (Shafiq et al., 2015). Fatorachian et Kazemi font valoir la complémentarité des technologies de l'Industrie 4.0, avec l'IoT permettant d'assurer la communication entre les différents équipements de CPS alors que le *Big Data* assure la gestion de toutes les données qui en sont issues (Fatorachian & Kazemi, 2018).

D'autres auteurs, comme Qi et Tao, relèvent aussi l'intérêt de l'IoT pour la collecte des données du processus de production (Qi & Tao, 2018). Ces technologies peuvent également servir à synchroniser les informations collectées ou assurer la communication entre toutes les composantes du système de production (machines, système d'informations, opérateurs) (Fatorachian & Kazemi, 2018 ; Ghobakhloo, 2018). Afin de traiter les données obtenues via l'IoT, Cohen et al. proposent de combiner l'IoT avec l'IA pour améliorer différents processus, comme la planification, le pilotage de la production ou l'allocation des ressources (Cohen et al., 2019). Pour optimiser la planification de la production, d'autres articles suggèrent également que les données de production soient analysées par des systèmes de *Big Data* (Qi & Tao, 2018; Tao & Qi, 2019). Ang et al. suggèrent que l'association de l'IoT avec le *Big Data* peut également servir au suivi et au pilotage en temps réel de la production, voire de mettre en place un pilotage autonome (Ang et al., 2017). Pour synchroniser le fonctionnement des différentes machines des lignes de production, Zhong et al. suggèrent l'utilisation du *cloud* (Zhong et al., 2017). La capacité à connecter les éléments du système de production du *cloud* et la niveau de puissance de calcul qu'il apporte offrent la base numérique pour déployer les autres composants de l'Industrie 4.0 (Y. Chen, 2017; Rossit et al., 2019).

Une fois les informations collectées et traitées, les logiciels de simulation et de modélisation peuvent être utilisés pour les visualiser et représenter le processus de production en temps réel, aidant à son suivi et pilotage (Longo et al., 2019). Les simulations pourraient également être utilisées pour supporter la prise de décision pour la planification, permettant de comparer différentes configurations. Avec l'acquisition et le traitement des données en temps réel, des éléments de réalité augmentée peuvent être mis en place pour l'accompagnement des opérateurs à la réalisation de leurs tâches (Ang et al., 2017; Blanco-Novoa et al., 2018; Cohen et al., 2019). L'automatisation des opérations de production est un processus déjà avancé dans les entreprises industrielles, entre autres pour réduire les coûts. Néanmoins, les technologies de l'Industrie 4.0 permettent de déployer plus

largement cette automatisation, grâce notamment à une meilleure interopérabilité et une plus grande intelligence des machines (Ghobakhloo, 2018). Une autre application des machines autonomes est la mise en place de robots collaboratifs, aussi appelés cobots (Y. Chen, 2017). Ces cobots peuvent servir à supporter les opérateurs dans des tâches difficiles ou renforcer leur sécurité. L'utilisation de fabrication additive peut être mise en place pour produire des pièces au moment où le besoin s'en fait sentir, accélérant le flux de production et réduisant le besoin de stock (T. Chen & Lin, 2017).

À la suite du travail de synthèse des éléments de la littérature, nous avons identifié plusieurs fonctions technologiques pour la production : les technologies pour la planification, le traitement des données de production, le guidage des opérateurs de production, les machines de production, la cobotique. Ces sujets ont fait l'objet d'un développement avec l'expert industriel, ce qui a donné les échelles de maturité suivantes :

Planification de la production (Tableau 33) :

Niveau 1	Planification manuelle sur un support non informatisé
Niveau 2	Planification numérique non automatisé de la production, ou planification numérique automatisée sans intégration automatique des données du système de production
Niveau 3	Planification numérique de la production automatisée avec prise en compte automatique des données de statut de la production
Niveau 4	Planification numérique automatisée de la production intégrant les données en temps du système de production pour proposer des corrections en cas de détection de dérives

Tableau 33. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la planification de la production

Suivi et traitement des données de production (Tableau 34) :

Niveau 1	Mesures par capteurs et collecte des données manuellement ou via les interfaces des machines de production
Niveau 2	Collecte et centralisation numériques des données du système de production
Niveau 3	Collecte et centralisation numérique des données du système de production en temps réel
Niveau 4	Collecte et traitement automatisé des données des processus en temps réel, pouvant permettre la mise en place de rétroaction

Tableau 34. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour le suivi et le traitement des données de production

Guidage des opérateurs de production (Tableau 35) :

Niveau 1	Utilisation de modes opératoires non informatiques pour le guidage des tâches
Niveau 2	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires sur interfaces numériques
Niveau 3	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires avec suivi autonome des tâches
Niveau 4	Guidage automatisé pour les tâches manuelle des opérateurs

Tableau 35. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques de guidage des opérateurs de production

Machines du système de production (Tableau 36) :

Niveau 1	Pas d'automatisation ; Machines de production traditionnelles non numériques
Niveau 2	Automatisation de tâches individuelles de production ; Machines à commandes numériques, pilotées sur pupitre
Niveau 3	Automatisation de suites de tâches importantes des processus de production (type changement d'outils, lignes automatisées, ...) ; Machines à commande numérique, avec Fabrication Assistée par Ordinateur ; Capacité à produire des pièces par fabrication additive
Niveau 4	Mise en place de technologies de production autonomes intelligentes, capables de s'adapter automatiquement à différentes situations (ex : robots)

Tableau 36. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques des machines du système de production

Assistance et collaboration technologique (Tableau 37) :

Niveau 1	Collaboration entre hommes et machines totalement séparée, sans interface commune
Niveau 2	Assistance technologique ponctuelle à contrôle manuel pour tâches manuelles simples (ex : préhenseurs)
Niveau 3	Assistance technologique automatique, robotisée pour opérations collaboratives avec les humains (ex : cobots)

Niveau 4	Assistance technologique automatique, robotisée pour opérations collaboratives complexes avec les humains, intégrant de l'intelligence artificielle pour l'adaptation en temps réel
----------	---

Tableau 37. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques d'assistance et de collaboration technologique

Nous présentons le diagramme de classes UML du modèle de données pour l'axe « Production » de la dimension « maturité technologique », permettant de mieux expliciter les liens entre les différents éléments (Figure 14). L'axe « Production » est composé de cinq fonctions, qui sont, comme présenté précédemment, évaluées sur quatre niveaux.

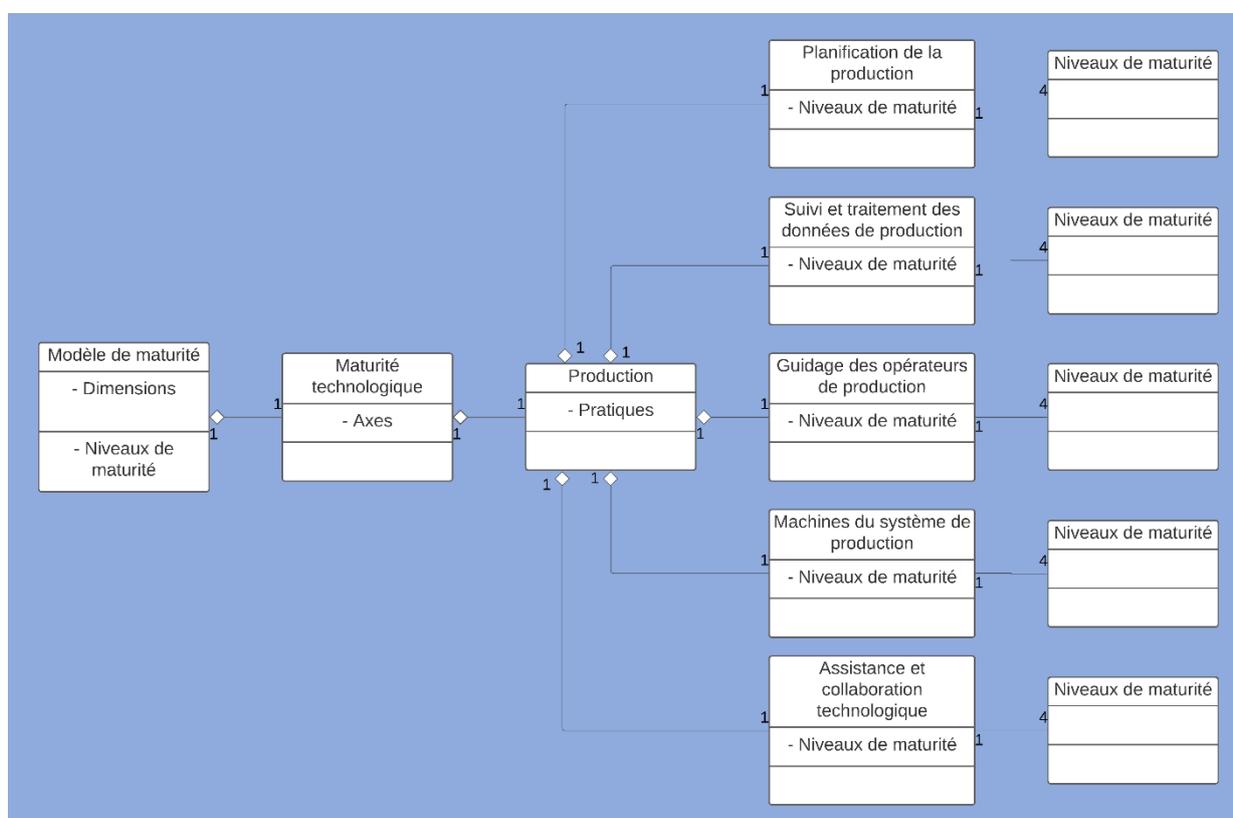


Figure 14. Structuration de l'axe "Production" de la maturité technologique

Le paragraphe suivant présente la démarche suivie pour la construction des grilles de maturité pour l'axe de maintenance de la maturité technologique.

#### 4) Maintenance

Les technologies de l'Industrie 4.0 offrent différentes possibilités pour la gestion de la maintenance. Grâce à l'implantation de technologies CPS, il est possible de mettre en place un suivi en temps réel

---

des machines de la ligne de production (Ansari et al., 2019). Ainsi, l'équipe maintenance peut avoir accès à toutes les données de suivi à tout moment pour surveiller l'état de santé des machines. Les CPS sont d'ailleurs considérés par Longo et al. comme les bases pour la réalisation de jumeaux numériques des équipements de production et les sources de données pour les logiciels de simulations servant au suivi de leur santé (Longo et al., 2019). L'acquisition et la transmission des données peuvent également, d'après Li et al., être effectuées grâce à l'IoT (Li et al., 2017). Ils proposent également une démarche pour l'utilisation de ces données, grâce à du *Big Data*, pour le diagnostic de l'état des machines et la détection de défauts. Le *Big Data* peut également servir à mettre en place le suivi en temps réel des machines, ce qui ouvre la porte à la détection au plus tôt des anomalies, voire à la maintenance prédictive (Canizo et al., 2019; Y. Chen, 2017).

Plusieurs auteurs, comme Illa et Padhi, ou encore Tao et Qi, donnent des exemples concrets de systèmes prédictifs pour le suivi du cycle de vie des équipements (Illa & Padhi, 2018; Tao & Qi, 2019). Ang et al. proposent l'association de l'IoT et du *Big Data* avec des logiciels de simulation et de modélisation pour une application de suivi de la santé des machines (Ang et al., 2017). De leur côté, Qi et Tao présentent plutôt la combinaison du *Big Data* avec l'utilisation de jumeaux numériques, permettant de mettre ces informations à la disposition des équipes d'opérateurs et de techniciens (Qi & Tao, 2018). Afin de stocker le grand volume des données de maintenance, Caggiano et al. ainsi que Turner et al. suggèrent l'utilisation de serveurs *cloud*, qui peuvent également fournir des capacités de calcul pour les traiter (Caggiano, 2018; Turner et al., 2019). Pour optimiser le traitement de ces données, des articles comme celui de Wan et al. préconisent l'utilisation de l'IA, ce qui permettrait l'établissement de pratiques de maintenance prédictive (Wan et al., 2018). Un autre exemple est présenté par Ansari et al., proposant un modèle pour la maintenance prédictive, basé sur une association des CPS et de l'IA pour soutenir la prise de décision et le traitement des données remontant du système de production (Ansari et al., 2019). Un autre ensemble de technologies issues de l'Industrie 4.0 pouvant être exploitées pour la maintenance est les technologies de visualisation. Deux grandes utilisations sont présentées dans la littérature : tout d'abord, le guidage et l'accompagnement des tâches de maintenance, en particulier grâce à l'utilisation de technologies de AR. (Blanco-Novoa et al., 2018; Nagy et al., 2018; Rao & Prasad, 2018; Roy et al., 2016). Par exemple, Blanco-Novoa et al. indiquent qu'elles peuvent servir à repérer les anomalies en les mettant en évidence pour les techniciens. La seconde fonction présentée est la mise en place de formations des équipes de maintenance supportées par de l'AR ou de la VR (Roy et al., 2016).

Une fois la synthèse de la revue de littérature réalisée, nous avons listé les différentes fonctions technologiques pour la maintenance : l'acquisition et le traitement des données pour la maintenance, le suivi des tâches de maintenance, le guidage et la formation des opérateurs de maintenance. Ces

résultats ont ensuite été traités avec l'expert industriel. Ainsi, nous avons établi les échelles de maturité suivantes :

Acquisition et traitement des données pour la maintenance (Tableau 38) :

Niveau 1	Acquisition de valeurs techniques de maintenance
Niveau 2	Acquisition de données industrielles non structurées, non transférables pour analyse de la maintenance
Niveau 3	Acquisition de données industrielles, transmission et structuration de ces données pour analyse de la maintenance
Niveau 4	Suivi de la santé des machines de l'atelier, apprentissage pour la qualification et la prédiction des pannes

*Tableau 38. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques d'acquisition et de traitement des données pour la maintenance*

Suivi des opérations de maintenance (Tableau 39) :

Niveau 1	Relevé manuel des données de maintenance et suivi non informatisé
Niveau 2	Suivi informatique des tâches de maintenance (support informatique de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO))
Niveau 3	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO
Niveau 4	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO, permettant la détection automatique des besoins et des tâches de maintenance

*Tableau 39. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour le suivi des opérations de maintenance*

Guidage des opérateurs de maintenance (Tableau 40) :

Niveau 1	Modes opératoires non informatisés
Niveau 2	Support informatique pour les modes opératoires de maintenance
Niveau 3	Support numérique interactifs pour le guidage des tâches manuelles de maintenance
Niveau 4	Technologies de visualisation pour le guidage automatisé des tâches manuelles de maintenance

*Tableau 40. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour le guidage des opérateurs de maintenance*

Formations des opérateurs de maintenance (Tableau 41) :

Niveau 1	Pas de technologies numériques pour la formation des opérateurs de maintenance
Niveau 2	Système numérique pour la formation des équipes à la maintenance
Niveau 3	Système numérique interactif pour le guidage pour la formation des équipes à la maintenance
Niveau 4	Guidage par logiciel de visualisation pour la formation à la maintenance

Tableau 41. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la formation des opérateurs de maintenance

Pour formaliser les liens entre ses différents éléments, nous présentons le modèle de données sous forme de diagramme de classes UML de l'axe « Maintenance », qui fait partie de la dimension « maturité technologique » (Figure 15). L'axe « Maintenance » est composé de quatre fonctions, qui sont, comme présenté précédemment, évaluées sur quatre niveaux.

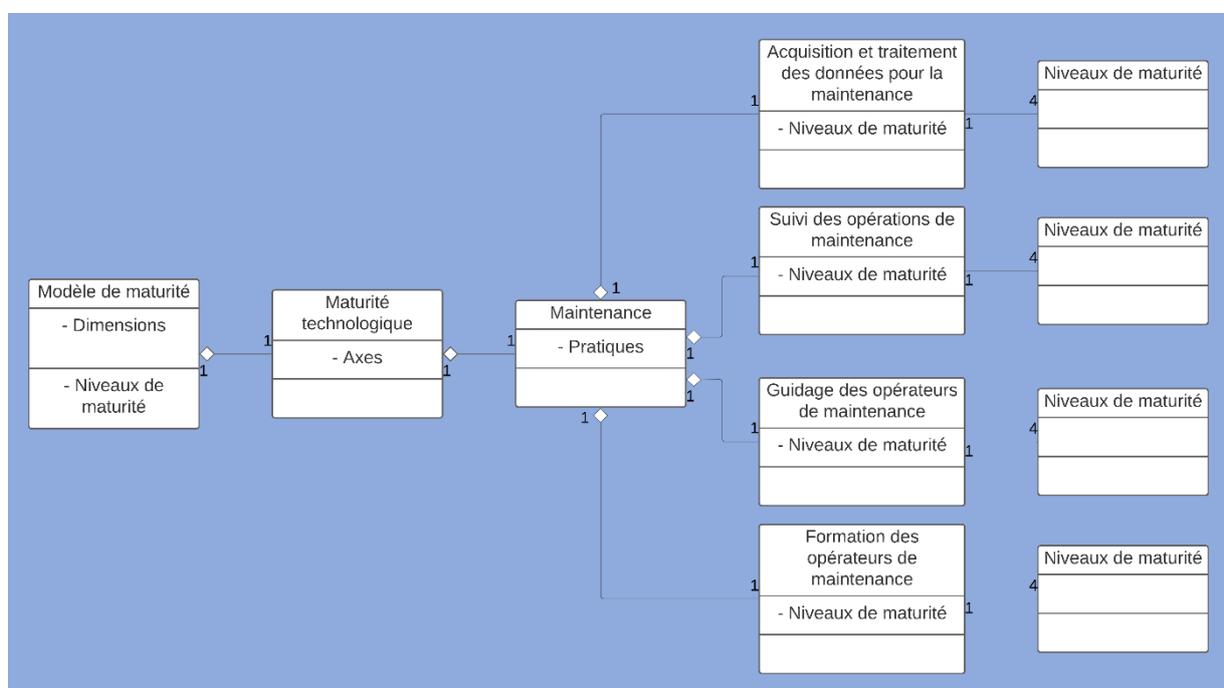


Figure 15. Structuration de l'axe "maintenance" de la maturité technologique

Afin de compléter la dimension « maturité technologique », nous avons développé l'axe « qualité », ce qui est le sujet de la partie suivante.

## 5) Qualité

L'utilisation des capteurs de l'IoT peut servir dans le cadre de la détection et la prévention de défauts dans la production. En effet, l'identification des données associées à des produits défectueux permettra ensuite leur détection et ainsi corriger les paramètres pour éviter que la suite de la production reproduise les erreurs (Illa & Padhi, 2018). Tao et Qi insistent sur le sujet, en indiquant que l'utilisation du *Big Data* pour le traitement des données remontées par l'IoT, facilitant le suivi et l'identification de changements dans les paramètres ou la qualité de la production (Tao & Qi, 2019). D'après Peres et al., une IA peut être mise en place pour accompagner les opérateurs dans la détection des défauts d'assemblage (Peres et al., 2019). Un exemple concret de cette fonction est donné par Kucukoglu et al., qui présentent des gants connectés à une IA pour équiper et guider les équipes dans cette tâche (Kucukoglu et al., 2018). Carvajal Soto et al. proposent une autre utilisation de l'IA, qui peut être associée à des logiciels de simulation pour étudier différents réglages des paramètres de production et ainsi identifier de manière prédictive des conditions d'apparition de défauts (Carvajal Soto et al., 2019)

Afin de faciliter les contrôles qualité, une autre méthode peut être l'utilisation de technologies de visualisation comme la réalité augmentée. Par exemple, Nagy et al. proposent de faciliter le suivi des vérifications de qualité grâce à l'affichage en réalité augmentée des check-lists à la place de feuilles de papier (Nagy et al., 2018). Une autre possibilité est la visualisation des modèles 3D des pièces et produits, permettant la comparaison avec les éléments à contrôler (Avalle et al., 2019; Blanco-Novoa et al., 2018; Ferraguti et al., 2019; Muñoz et al., 2019).

Après avoir effectué le travail de synthèse de la littérature, nous avons relevé différentes fonctions technologiques : la détection des défauts de production, l'importation et le traitement des données pour le suivi de la qualité et la procédure de contrôle visuel de la qualité. Ces fonctions sont ensuite développées avec l'expert industriel, nous permettant de constituer les échelles de maturité suivantes :

Détection de défauts de production (Tableau 42) :

Niveau 1	Détection de défauts de qualité par capteurs mécaniques
Niveau 2	Détections de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques, sur pièce à posteriori de la production
Niveau 3	Détections de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques connectés, en temps réel de la production

Niveau 4	Détection de défauts de qualité dans la production avec automatisation des actions de correction et ajustement autonome des paramètres machines
----------	---

Tableau 42. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la détection de défauts de production

Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité (Tableau 43) :

Niveau 1	Traitement "manuel" des données pour le suivi de la qualité
Niveau 2	Traitement numérique automatisé des données "qualité" pour le suivi de la qualité importées manuellement
Niveau 3	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi de la qualité des processus de production
Niveau 4	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi et contrôle de la qualité des processus de production (Big Data) et correction automatisée du processus de suivi

Tableau 43. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour l'importation et le traitement des données pour le suivi de la qualité

Procédure de contrôle visuel de la qualité (Tableau 44) :

Niveau 1	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire à rechercher manuellement
Niveau 2	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique non interactif
Niveau 3	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique connecté interactif
Niveau 4	Contrôle visuel numérique de la qualité via mode opératoire en RA

Tableau 44. Niveaux de maturité pour les fonctions technologiques pour la procédure de contrôle visuel de la qualité

Nous avons mené une étude de la littérature et traité les résultats avec un expert, ce qui nous a permis d'établir les niveaux de maturité des fonctions technologiques de l'axe « Qualité ». Pour expliciter les liens entre ces éléments, nous présentons le diagramme de classes UML de l'axe (Figure 16). Cet axe, composante de la dimension « Maturité technologique », est constitué de quatre fonctions mesurées sur quatre niveaux de maturité. Ces niveaux de maturité ont été exposés précédemment.

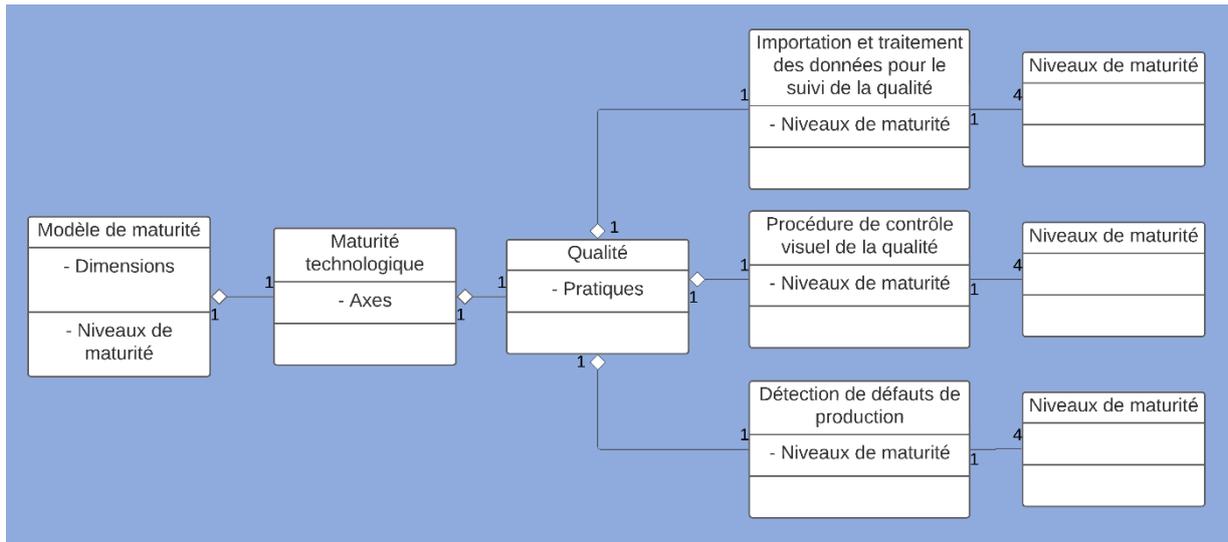


Figure 16. Structuration de l'axe "qualité" de la maturité technologique

Ainsi, nous avons construit l'ensemble des grilles de maturité pour toute la dimension de maturité technologique. Pour conclure la construction de notre modèle de maturité, nous avons également bâti les éléments pour la dimension de capacité de conduite du changement, ce qui sera présenté dans la partie suivante.

### c. Capacité à conduire le changement

La conduite du changement n'étant pas dépendante des processus de production de l'entreprise, les axes des deux autres dimensions (maturité des processus et maturité technologique) ne peuvent pas convenir. Il est donc nécessaire de déterminer quels axes et quelles pratiques structurent cette dimension. C'est pourquoi une étude de la littérature a été menée.

Dans leur article, Clarke et Garside ont identifiés différents facteurs clés de succès pour les processus de transformation (Clarke & Garside, 1997). Ils ont listé les facteurs suivants :

- L'implication de la direction, ce qui inclue une stratégie globale, une formation des cadres, la mise à disposition des ressources nécessaires, et l'intégration de personnes à tous les niveaux de l'organisation ;
- Les pratiques de communication, à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise, en se concentrant sur le contenu et les méthodes ;

- Des outils et méthodes dédiés, avec les pratiques de gestion de projet, l'utilisation d'indicateurs, et la mise en place des actions permettant d'acquérir les connaissances et compétences nécessaires, comme des formations ou des prestations extérieures ;
- Les interactions, c'est-à-dire la gestion des conflits entre les opérations courantes et les étapes de transformation ;
- La gestion des enjeux culturels et sociaux, qui traite de problématiques comme les perceptions et l'attitude du personnel envers le changement.

Ces facteurs sont ensuite utilisés comme bases pour un modèle de maturité (Clarke & Manton, 1997), chaque facteur étant traité comme les dimensions de ce modèle. Ces dimensions sont déclinées sur six niveaux de maturité, du niveau 0, correspondant à une situation où aucune action n'est réellement mise en place, au niveau 5, impliquant la mise en place de solides pratiques formalisées et suivies. Une fois les niveaux identifiés, des objectifs de progrès sont définis, devant être réalistes pour l'entreprise et devant traiter les dimensions les plus faibles en priorité. Un plan d'action est ensuite construit et mis en place pour atteindre ces objectifs.

Parmi les éléments de succès des projets de transformation en entreprise, Kurt Lewin insista sur l'importance cruciale de la circulation de toutes les informations liées à cette transformation à toutes les étapes du projet (Lewin, 1951).

Dans son livre, John Hayes souligna qu'il est nécessaire d'impliquer correctement les membres de l'entreprise dans les processus de transformation, afin d'assurer une adhésion au projet et une réelle adoption du changement à l'issue de celui-ci (Hayes, 2002). Il indiqua également que, pour garantir un bon déroulement du projet, l'entreprise devrait se doter d'une équipe projet dédiée ainsi que d'un processus formalisé consacré à la conduite du changement.

L'importance de mettre en place un processus formalisé pour mener des projets de transformation a également été relevé par (Motawa et al., 2007). Ils proposent dans leur article une procédure en quatre étapes pour mener le changement :

- D'abord, le lancement, incluant une phase de définition du sujet concerné par le changement ;
- Ensuite, l'identification et l'évaluation des options de changement ;
- Puis la validation et la mise en place du changement ;
- Enfin, le bilan, avec acquisition de connaissances pour les prochaines transformations.

De son côté, John P. Kotter présente dans son livre un processus en huit étapes pour la conduite du changement dans les organisations, après avoir insisté sur l'importance pour les entreprises de disposer et d'utiliser pour ce type de sujets d'un processus formalisé et bien implanté (Kotter, 2012).

Parmi ces huit étapes, on retrouve : la construction d'une équipe au niveau de la direction pour la conduite du changement, le développement d'une stratégie formalisée ou encore la communication autour du besoin de transformation et de la stratégie suivie par l'entreprise. Il identifie également d'autres critères d'importance :

- La désignation d'une équipe dédiée au projet de changement possédant une réelle influence au sein de l'entreprise ;
- Une implication dans le changement à tous les niveaux de la direction et de l'encadrement ;
- Une communication bien établie avec tous les membres de l'entreprise ;
- L'acquisition, par les employés, des nouvelles connaissances et compétences nécessaires pour pouvoir implanter et bénéficier de manière pérenne des changements, ce qui implique que l'identification et la mise en place de formations doit faire partie du processus de conduite du changement.

En 2009, Sun et al. publient un modèle de maturité de la conduite du changement (Sun et al., 2009). Ce modèle est déployé sur six dimensions, représentant des processus clés de la conduite du changement :

- Le processus de gestion du changement, qui comprend toutes les pratiques mises en place pour conduire les projets de transformation de l'entreprise, qui doivent être cohérentes, efficaces et systématiques ;
- La gestion des risques, servant à identifier en amont des difficultés potentielles pour les désamorcer ;
- La communication, qui évalue les moyens de communication en place ainsi que leur niveau d'utilisation, pour assurer la circulation des informations auprès de tous les acteurs concernés par les changements ;
- La gestion des informations, visant à s'assurer que les bonnes informations soient disponibles au bon moment et pour les bonnes personnes pour le bon déroulement du projet ;
- La collaboration, mesurant la confiance et la coopération entre les acteurs du projet, pour la bonne exécution de ce dernier ;
- Le leadership, qui évalue l'implication de la direction, la définition des objectifs et la construction de l'équipe projet.

Chacune de ces dimensions est décrite sur cinq niveaux de maturité, allant d'un niveau 1, « gestion du changement ad-hoc », où il n'y a pas de pratiques formellement établies ou appliquées de manière systématique, à un niveau 5, « amélioration continue dans la conduite du changement », où des processus de conduite de changement sont en place, basés sur des pratiques solides et sujets à un

apprentissage pour permettre une amélioration continue. A travers l'étude de ces différentes sources, nous avons identifié et choisi deux axes pour l'évaluation de la maturité de la conduite du changement des entreprises : l'implication de la direction et la méthodologie de conduite du changement. Une échelle de maturité générale pour préciser ces deux axes a été développée, en trois niveaux (Tableau 45) :

Niveau 1	Pratiques ad-hoc de conduite du changement
Niveau 2	Pratiques de conduite du changement formalisées et systématisées
Niveau 3	Pratiques de conduite du changement en amélioration continue

Tableau 45. Echelle générale de maturité pour la capacité à conduire le changement

Le sujet de l'implication de la direction intègre à la fois le fait que la direction de l'entreprise mène et soutienne directement les projets de transformation, mais également le fait qu'elle mette en place les conditions favorables aux succès de ces projets, par la construction d'équipes dédiées et la mise à disposition de toutes les ressources nécessaires, que ce soit en termes de temps disponible pour le projet ou de moyens financiers. Cet axe a donc été divisé en deux ensembles de pratiques :

Implication directe de la direction (Tableau 46) :

Niveau 1	Il n'y a pas ou peu de support visible de la direction ; les réunions de l'équipe projet se font systématiquement ou presque systématiquement en l'absence d'un membre ou d'un représentant de la direction ; les projets de transformation sont lancés sans nécessairement répondre à la stratégie d'entreprise
Niveau 2	Un porteur du projet auprès de la direction est nommé, mais est peu impliqué ou pas assez influent pour défendre efficacement le projet ; ponctuellement, des actions ou des communications soulignent l'intérêt de la direction pour le projet de transformation ; la présence de membres ou de représentants de la direction aux réunions de projets est régulière mais pas systématique ; les projets de transformation sont lancés après avoir été validés en regard à la stratégie d'entreprise

Niveau 3	Un porteur de projet avec une réelle influence au niveau de la direction est nommé ; l'implication de la direction est visible pour toute l'entreprise, à toutes les étapes du projet, même après l'implantation ; la présence de membres ou de représentants de la direction est systématique aux réunions du groupe projet
----------	--

Tableau 46. Niveaux de maturité pour les pratiques d'implication directe de la direction

Mise à disposition des ressources (Tableau 47) :

Niveau 1	Le changement est lancé et des équipes sont impliquées uniquement lorsque les tâches opérationnelles laissent du temps libre ; il y a des problèmes réguliers de ressources (personnelles ou matérielles) ; il est difficile de mettre en place les formations nécessaires pour les équipes
Niveau 2	Les tâches opérationnelles rentrent parfois en conflit avec l'avancée du projet ; il y a des problèmes ponctuels de ressources humaines ou matérielles ; des formations sont lancées lorsque les tâches opérationnelles en laissent le temps
Niveau 3	Il n'y a aucun problème de ressources humaines ou matérielles sur tout le déroulement des projets de changement ; des ressources spécifiques (en temps et en moyen) sont dédiées à la formation des équipes systématiquement à chaque projet

Tableau 47. Niveaux de maturité pour les pratiques de mise à disposition des ressources

Afin de structurer les informations manipulées et formaliser les liens entre les axes et les pratiques, un modèle de données est présenté sous forme d'un diagramme de classes UML (Figure 17). Cette figure montre les classes liées à l'axe « Implication de la direction ». Cet axe, faisant partie de la dimension « Capacité à conduire le changement », est caractérisé par ses deux pratiques qui sont évaluées en trois niveaux présentés précédemment.

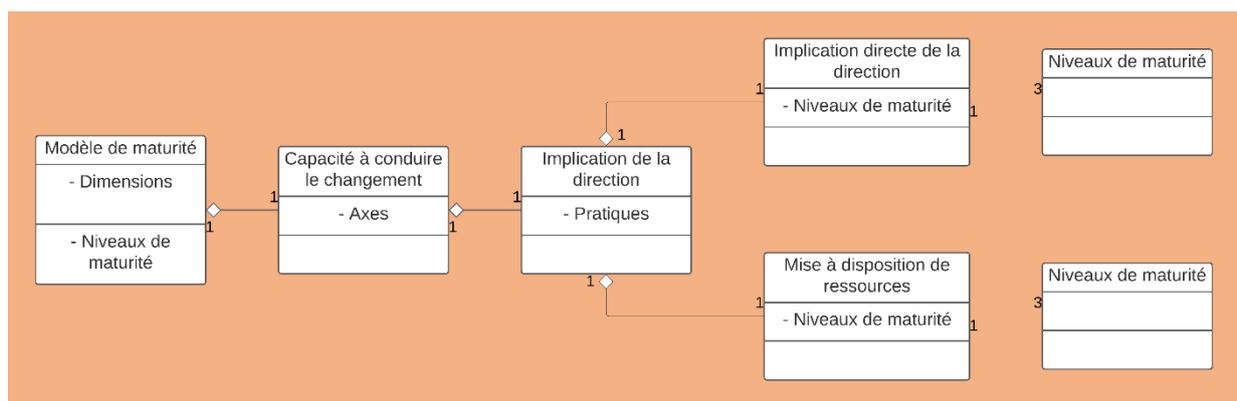


Figure 17. Structuration de l'axe "implication de la direction" de la capacité à conduire le changement

La méthodologie de conduite du changement s’intéresse aux outils et pratiques en place pour faciliter le déploiement des transformations. Elle s’intéresse également aux actions menées pour assurer la bonne circulation des informations au sujet des projets de changement. Cet axe a également été divisé en deux ensembles de pratiques :

Communication (Tableau 48) :

Niveau 1	Peu de personnes dans la structure connaissent l'importance des projets de changement, leur avancement ou leurs impacts réels ; leur intérêt n'est pas évident pour la plupart du personnel ; La communication est très majoritairement descendante ; il n'y a pas de canal formel pour de la communication montante
Niveau 2	Les personnes directement concernées sont au courant de l'avancement des projets de transformation, mais pas forcément le reste du personnel ; des canaux formels sont toujours en place pour de la communication descendante ; des communications montantes peuvent être ponctuellement mis en place
Niveau 3	Tout ou presque tout le personnel est au courant des projets de transformation, de leur intérêt et de leurs impacts ; des canaux formels sont en permanence en place pour des communications dans les deux sens

Tableau 48. Niveaux de maturité pour les pratiques de communication

Pratiques de gestion de projet (Tableau 49) :

Niveau 1	Des techniques de gestion de projet ne sont jamais ou rarement mis en œuvre ; pas ou peu de personnes sont formées à ces techniques ; il n'y a pas d'équipes claires pour conduire les projets de changement ; il n'y a pas de processus ou de tâches clairement établis pour la conduite du changement, l'identification ou la mise en place des formations nécessaires aux équipes concernées par le changement
Niveau 2	Une équipe est fixée avec un pilote de projet ; le pilote connaît et applique régulièrement des outils de gestion de projets ; le processus intègre systématiquement des étapes d'identification et de mise en place des formations nécessaires pour les équipes concernées par le changement
Niveau 3	Une méthodologie de gestion de projets est établie, maîtrisée et systématiquement appliquée pour tous les projets de transformation ; chaque fin de projet est l'occasion de retours d'expériences et d'ajustements, dans une démarche d'amélioration continue

Tableau 49. Niveaux de maturité pour les pratiques de gestion de projet

Pour aider à la structuration des informations manipulées et la formalisation des liens entre les axes et les pratiques, nous présentons un modèle de données sous forme d'un diagramme de classes UML (Figure 18). Cette figure montre les classes liées à l'axe « Méthodologie de conduite du changement ». Cet axe, qui fait partie de la dimension « Capacité à conduire le changement », est caractérisé par ses deux pratiques qui sont évaluées en trois niveaux présentés précédemment.

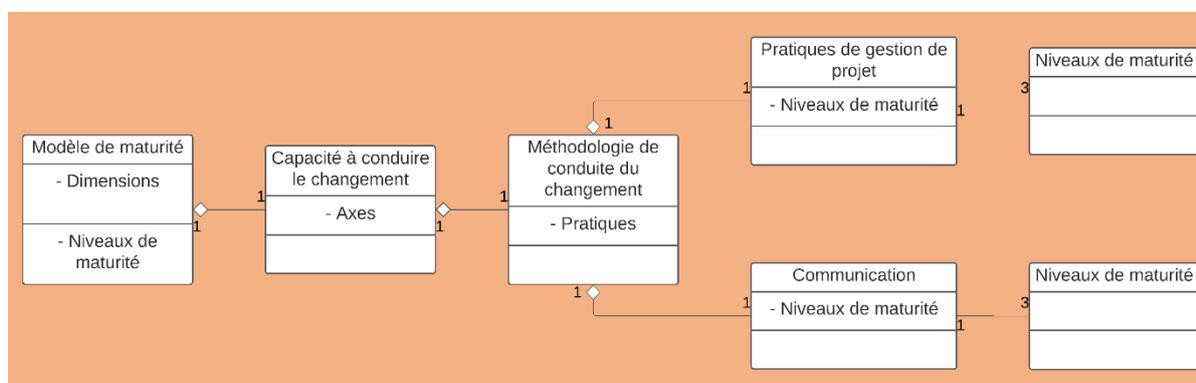


Figure 18. Structuration de l'axe "méthodologie de conduite du changement" de la capacité à conduire le changement

## VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé et présenté un modèle de maturité, qui représente notre première contribution. L'objet de ce modèle est de mesurer la capacité des entreprises industrielles à intégrer de nouvelles technologies.

Nous avons d'abord développé une première version basée sur huit dimensions, qui est confrontée à un panel d'experts. Suite à leurs retours, nous avons mené une étude de littérature pour composer une seconde version de ce modèle de maturité. Il repose sur trois dimensions, à savoir la maturité technologique, la maturité des processus et la capacité à conduire le changement. Les deux premières dimensions sont déclinées sur cinq axes : production, maintenance, logistique, qualité et conception de nouveaux produits et processus. Ces axes se divisent ensuite en différents ensembles de pratiques, chacun organisés en échelles de maturité sur quatre niveaux. La dimension de capacité à conduire le changement est caractérisée par deux axes, qui se déclinent chacun en deux ensembles de pratiques : l'implication de la direction et la méthodologie de conduite du changement. Ces ensembles sont divisés sur trois niveaux de maturité. Le modèle repose donc sur un total de 39 échelles de maturité.

Pour présenter la structuration de l'ensemble des éléments de ce modèle de maturité, nous avons construit un diagramme de classes UML (Figure 19). Le modèle de maturité est composé de trois dimensions : « maturité des processus », « maturité technologique » et « capacité à conduire le changement ». A travers les différents axes de ces dimensions, le modèle permet de mesurer des niveaux de maturité permettant d'établir une image détaillée de l'état des pratiques des entreprises.

Il est maintenant nécessaire d'établir comment mettre en place ce modèle et l'utiliser auprès des entreprises afin de déterminer leurs niveaux et d'identifier des actions d'améliorations et d'évolutions pour leurs processus et leur développement technologique. Ce travail est présenté dans le chapitre suivant.

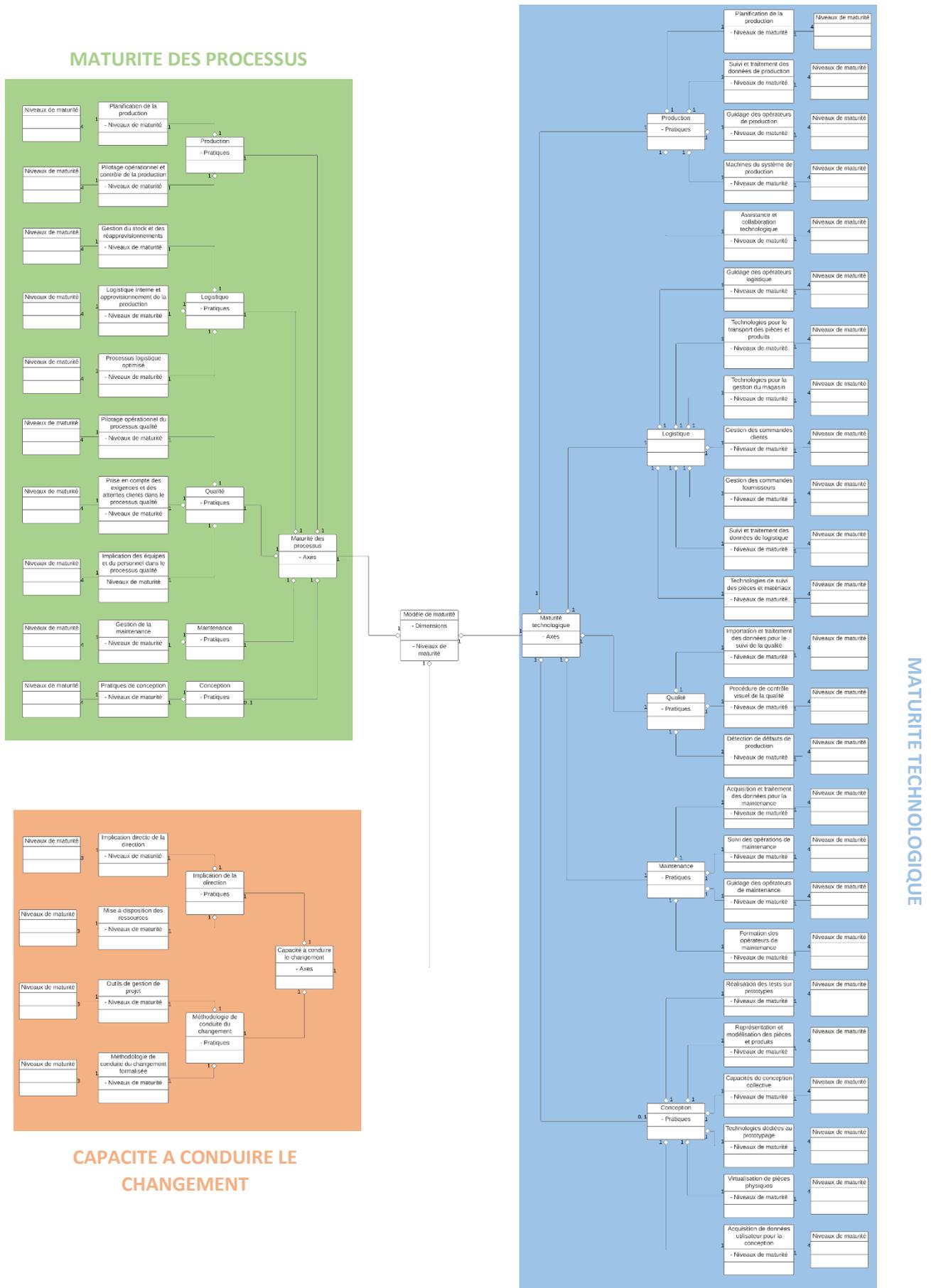


Figure 19. Diagramme de classes du modèle de maturité 2MTI proposé

## Chapitre 3

---

# Etablissement de règles d'accompagnement à l'évolution technologique : application à la technologie ERP

---

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>96</b>
<b>II.</b>	<b>CONSTRUCTION DES REGLES DE PREREQUIS.....</b>	<b>98</b>
<b>III.</b>	<b>CONSTRUCTION DES REGLES D'EVOLUTION TECHNOLOGIQUE.....</b>	<b>101</b>
<b>IV.</b>	<b>EXEMPLE D'UTILISATION.....</b>	<b>108</b>
<b>V.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>113</b>

## I. Introduction

Le modèle de maturité ayant été construit, il est maintenant nécessaire d'établir les moyens d'exploiter ses résultats, afin de pouvoir effectivement mettre en place l'accompagnement des entreprises industrielles pour l'évolution de leurs dispositifs technologiques. Le but étant de recommander des actions pour que l'entreprise gagne en maturité, deux aspects ont été soulevés :

- Comment s'assurer de la bonne mise en place des pratiques ou des technologies recommandées ?
- Quels bénéfices l'entreprise tirerait-elle de la mise en place des pratiques ou des technologies recommandées ?

Pour répondre à la première question, nous nous sommes intéressés aux besoins de prérequis pour la bonne implantation de nouvelles pratiques ou technologies. Ces prérequis concernent des bases technologiques devant déjà être en place dans l'entreprise, mais également des pratiques organisationnelles, ou une capacité minimale à conduire le changement. Donc les prérequis impliquent les trois dimensions de notre modèle de maturité.

Pour répondre à la seconde question, nous avons souhaité établir des prédictions d'évolution technologique. L'intégration de nouvelles technologies dans les entreprises industrielles est généralement menée dans le but d'en tirer différents bénéfices. L'idée est d'identifier les gains que les entreprises accompagnées souhaitent obtenir lors de ces accompagnements et de les confronter aux bénéfices potentiels des différentes possibilités de technologies. Ainsi, il sera possible de sélectionner les évolutions possibles identifiées à la suite de l'utilisation de notre modèle de maturité, mettant en avant celles étant les plus à même de répondre aux besoins des organisations accompagnées.

Ainsi, l'établissement de ces deux lots de règles (règles de prérequis et prédictions d'évolution technologique) devrait permettre la construction de propositions d'action pour l'évolution du dispositif technologique, à partir des résultats du modèle de maturité (Figure 20).

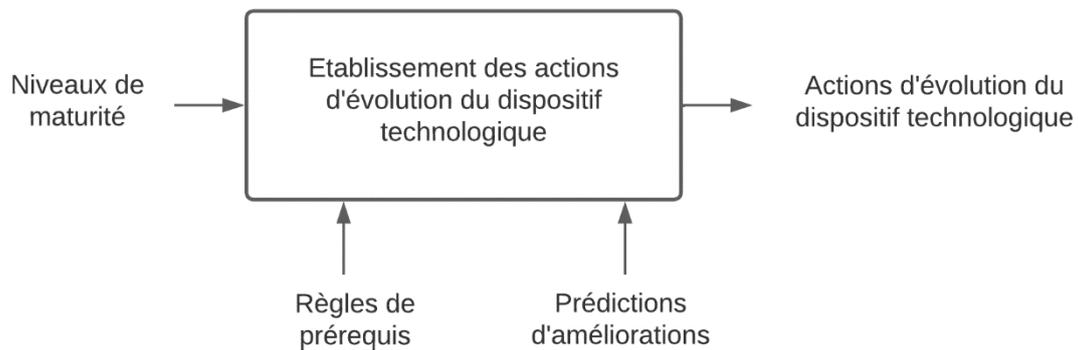


Figure 20. Système d'établissement des actions d'évolutions du dispositif technologique des entreprises

Pour illustrer le processus suivi pour la construction de ces règles, les paragraphes suivants présentent les étapes suivies avec l'exemple de la technologie de l'*Enterprise Resource Planning* (ERP).

**Définition :** Les systèmes ERP (*Enterprise Resource Planning*, ou Progiciel de Gestion Intégré, PGI) offrent des solutions logicielles intégrées pour administrer, planifier et contrôler les processus créant de la valeur ajoutée dans l'entreprise, constituant la base du traitement de l'information dans l'entreprise. Les ERP d'aujourd'hui se concentrent sur l'extension de leurs fonctionnalités en intégrant divers systèmes spécialisés par le biais de l'APS (*Advanced Planning and Scheduling*, planification et ordonnancement avancés) (Lichtblau et al., 2018)

Le choix s'est porté sur cette technologie car elle est considérée comme une technologie transversale, liée à différentes pratiques et différentes dimensions de notre modèle, que ce soit la maturité des processus ou la maturité technologique. En effet, Karimi et al. considèrent que l'intégration d'un ERP entraîne des impacts sur les processus et les technologies de production, de logistique et de développement de nouveaux produits (Karimi et al., 2007). L'impact de l'ERP sur les processus de logistique et de production est également reconnu par Al-Mashari et Al-Mudimigh, qui ajoutent également la maintenance à cette liste, de même que Hawking et al. (Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Hawking et al., 2004). Shang et Seddon ont également identifié la production et la qualité comme les processus impactés par l'intégration d'un ERP (Shang & Seddon, 2000). Pour Sadrzadehrafiei et al., les processus impliqués par l'ERP sont la production, la logistique, la qualité et la maintenance (Sadrzadehrafiei et al., 2013).

## II. Construction des règles de prérequis

Le besoin de prérequis pour la bonne intégration de nouvelles technologies a déjà été soulevé précédemment, que ce soit en termes de maturité des processus (Huber, 2016), de maturité technologique (Obiso et al., 2019) ou de conduite du changement (Kollros, 2021) (cf. Chapitre 1). Afin de pouvoir concrètement appliquer ces prérequis, il est nécessaire de les traduire en règles claires pouvant être associées aux niveaux de maturité de notre modèle. La construction de ces règles se base sur une étude de la littérature, et plus précisément des cas d'études d'intégration d'ERP dans des entreprises industrielles.

Maguire et al. ont établi une liste des éléments nécessaires pour que l'implantation d'un ERP soit réussie (Maguire et al., 2010):

- Des pratiques formalisées et organisées de gestion de projet ;
- Des canaux de communication fonctionnels entre les employés et la direction ;
- La mise en place de formations spécifiques pour les utilisateurs de l'ERP ;
- Des technologies numériques déjà en place et maîtrisées pour les processus impactés par le futur ERP.

Ehie et Madsen ont également relevé le besoin de bonnes pratiques en gestion de projet pour une bonne implantation d'ERP (Ehie & Madsen, 2005). De plus, ils ont identifié le besoin d'un fort support de la direction derrière le projet d'intégration de l'ERP ainsi qu'une bonne formalisation des différents processus de l'entreprise.

Al-Mashari et Al-Mudimigh ont étudié le cas d'un échec d'implantation d'ERP dans une industrie (Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003). Parmi les causes d'échec, ils ont listé le manque d'un vrai processus de conduite du changement, le manque d'un processus de formation pour les utilisateurs et le manque de canaux de communication. Ils insistent également sur l'importance du fait que l'entreprise dispose de processus formalisés en amont du projet d'intégration d'un ERP.

Dans leur article, Hawking et al. ont également étudié des cas d'échecs, et en ont tiré différents critères empêchant les entreprises industrielles de réellement tirer les bénéfices de leur ERP (Hawking et al., 2004). Ils ont identifié :

- Le manque de conduite du changement ;
- Pas de formation ou formation inadaptée pour les utilisateurs ;
- Le manque de processus formalisés au sein de l'entreprise ;
- Le manque de pratiques de conduite du changement ;

- Le manque de temps dédié au projet.

Becker et Frolick ont souligné l'importance, dans le contexte de l'implantation d'un ERP, d'une communication efficace au sein de l'entreprise (Barker & Frolick, 2003). Ils ont également indiqué qu'il était fondamental que le projet d'intégration de l'ERP soit mené par une équipe dédiée, qui doit disposer d'un temps de travail dédié.

Ces différents prérequis relevés dans la littérature peuvent être rapprochés de différents niveaux de maturité issus de notre modèle. Par exemple, Barker et Frolock ainsi que Al-Mashari et Al-Mudimigh ont souligné l'importance de canaux de communication efficaces au sein de l'entreprise pour l'intégration d'un ERP (Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Barker & Frolick, 2003). Cela pourrait correspondre, au minimum, à la pratique « des canaux formels sont toujours en place pour de la communication descendante » qui appartient au niveau 2 de l'axe « méthodologie » de la dimension « conduite du changement » (voire à la pratique « des canaux formels sont en permanence en place pour des communications dans les deux sens », appartenant au niveau 3). Toujours dans l'axe « méthodologie » de la dimension « conduite du changement », on trouve la pratique de mise en place d'une équipe projet dédiée, ce qui peut correspondre à un des besoins identifiés par (Barker & Frolick, 2003) ou (Hawking et al., 2004).

D'autres pratiques de cet axe sont l'identification et la mise en place systématiques de formations adaptées pour les équipes (proche du besoin souligné par (Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Hawking et al., 2004; Maguire et al., 2010)), ou l'utilisation de méthodes de conduite de projet (pouvant être lié aux exigences identifiées par (Ehie & Madsen, 2005; Hawking et al., 2004; Maguire et al., 2010)). En établissant ainsi les liens entre les besoins pour la bonne intégration de la technologie ERP et le niveau de notre modèle de maturité, on peut établir la règle suivante : « Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 3 de l'axe « méthodologie » de la dimension « conduite du changement » ». De la même manière, un ensemble de règles de prérequis a pu être déduit, présenté dans le Tableau 50.

DIMENSION	AXE	REGLES DE PREREQUIS	REFERENCES
Conduite du changement	Implication de la direction	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Barker & Frolick, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Hawking et al., 2004; Maguire et al., 2010)

	Méthodologie	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 3	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Barker & Frolick, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Hawking et al., 2004; Maguire et al., 2010)
Maturité technologique	Production	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 3	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Karimi et al., 2007; Maguire et al., 2010)
	Logistique	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 3	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Karimi et al., 2007; Maguire et al., 2010)
	Maintenance	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Maguire et al., 2010)
	Qualité	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 3	(Maguire et al., 2010; Sadrzadehrafiei et al., 2013; Shang & Seddon, 2000)
	Conception	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Karimi et al., 2007; Maguire et al., 2010)
Maturité des processus	Production	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Karimi et al., 2007)
	Logistique	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Karimi et al., 2007)

	Maintenance	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Ehie & Madsen, 2005)
	Qualité	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Sadrzadehrafiei et al., 2013; Shang & Seddon, 2000)
	Conception	Avant d'essayer d'intégrer la technologie ERP, une entreprise doit être au moins au niveau 2	(Al-Mashari & Al-Mudimigh, 2003; Ehie & Madsen, 2005; Karimi et al., 2007)

Tableau 50. Ensemble de règles de prérequis pour l'intégration de la technologie ERP

### III. Construction des règles d'évolution technologique

Pour pouvoir établir des règles d'évolution technologique des entreprises, il est nécessaire d'avoir la capacité de mesurer les gains obtenus à la suite de l'intégration d'une nouvelle technologie. Pour ce faire, nous avons choisi d'identifier un ensemble d'indicateurs de performance.

**Définition** : Un indicateur de performance est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système, par rapport à une norme, un plan ou un objectif qui aura été déterminé et accepté, dans le cadre d'une stratégie d'ensemble (Courtois et al., 1989)

Ainsi, il sera possible de repérer les bénéfices d'une nouvelle technologie, grâce à l'évolution de ces indicateurs entre l'avant et l'après.

En général, les quatre priorités principales des entreprises industrielles pour leur compétitivité sont : les coûts ; la qualité ; les délais ; la flexibilité (Avella et al., 2001). Il existe des variations de ces priorités, comme celles de Dangayach et Deshmukh qui, en 2001, divisent les délais en deux priorités (« vitesse de livraison » et « fiabilité de livraison »), ou ajoutent, en 2006, une nouvelle priorité, l'innovation (Dangayach & Deshmukh, 2001, 2006). Néanmoins, ces quatre priorités sont toujours présentes.

Ces priorités servent régulièrement de bases pour l'établissements d'indicateurs de performance, puisque c'est sur ces sujets que les entreprises souhaitent progresser et donc être capables de mesurer

leurs progrès. C'est le cas de ceux présentés par Avella et al., groupés en quatre catégories, correspondant à ces quatre priorités (Avella et al., 2001) :

- Pour la priorité « coûts » : coûts faibles ;
- Pour la priorité « flexibilité » : changements de série rapides, introduction rapide de nouveaux produits, changements rapides de volumes, changements rapides du mix de produits et étendue de la gamme de produits ;
- Pour la priorité « qualité » : produits sans défauts, qualité perçue par les clients et produits durables ;
- Pour la priorité « délais » : livraisons rapides et livraisons ponctuelles et fiables.

Rebecca Castagnoli a listé, dans sa thèse, sept améliorations potentielles de performance lors de l'intégration de nouvelles technologies au sein des entreprises (Castagnoli, 2021). Elle précise que ces améliorations potentielles doivent être associées à des indicateurs, pour pouvoir suivre les progrès réalisés lors de l'implantation de ces nouvelles technologies. Elles sont : une plus grande vitesse de prototypage ; une plus grande productivité des équipes ; une plus grande flexibilité de production ; une capacité à produire de plus grands volumes de produits ; une meilleure opinion des clients sur les produits ; une amélioration de la qualité des produits et baisse du taux de rejet de produits ; une baisse du coût d'installation, du nombre d'erreurs et du temps d'arrêt des machines. Rebecca Castagnoli n'a pas fait référence directement aux quatre priorités des entreprises, mais les liens peuvent être établis. Par exemple, la priorité « qualité » est visible à travers l'indicateur « amélioration de la qualité des produits et baisse du taux de rejet de produits » ou la priorité « flexibilité » est représentée par l'amélioration potentielle « plus grande flexibilité de production ».

**Définition** : la flexibilité de la production est la capacité à changer ou à réagir avec une faible pénalité en temps, en effort, en coût ou en performance (Ayers, 2010).

Un autre ensemble d'indicateurs a été développé par Marek et al., basé sur les quatre mêmes catégories (Marek et al., 2020). Ils ont listé :

- Pour la catégorie « qualité », le niveau de satisfaction des clients, la qualité de la production et le taux de rejets de la production ;
- Pour la catégorie « délais », le respect des dates de livraison et le temps d'exécution de la production ;
- Pour la catégorie « flexibilité », l'étendue du catalogue de produits, la flexibilité de la planification de production et la variabilité sur la planification de production ;

- Pour la catégorie « coûts », le retour sur investissement, le coût à l'unité des produits et l'efficacité globale des équipements.

Dans leur article, Žižek et al. citent la norme ISO 22400 qui présente 34 indicateurs-clés de performance pour les entreprises produisant des produits (Žižek et al., 2020). Parmi ceux-là, on peut trouver « ratio de qualité », « taux de produits finis » ou bien « efficacité de l'opérateur ». Les auteurs de l'article précisent que ces indicateurs ont vocation à être utilisés au niveau stratégique de l'entreprise et proposent plutôt leur propre sélection d'indicateurs à utiliser à un niveau opérationnel pour le pilotage de la production. Ces indicateurs sont répartis en cinq groupes :

- *Sécurité et environnement*, avec le nombre d'accidents, le nombre d'alertes, la consommation d'eau, le niveau de production à partir de matière recyclée ou le nombre de dépassements des concentrations limites de substances nocives ;
- *Efficacité de la production*, avec l'efficacité des employés et de l'infrastructure, la consommation de matière première, la consommation d'énergie, le temps de cycle de la production des produits, l'efficacité des services ou les embouteillages dans le processus de production ;
- *Qualité de la production*, avec le pourcentage de produits finis ne respectant pas les critères de qualité, le taux de rebuts de matière première, qualité des services ;
- *Mise en place de la planification*, avec le niveau de respect de la planification, la proportion de production retardée, la proportion de production déclenchant des pénalités dues aux retards ou la proportion de production réalisée en avance ;
- *Employés*, avec le nombre de jours de travail perdus dus à des blessures ou une maladie, le nombre de suggestions pour des améliorations ou des innovations, le nombre de sessions de formations par employé, les variations de performance des employés, la réalisation des objectifs, le degré d'absentéisme des employés.

Le sujet de la qualité est traité par sa propre catégorie, ce qui n'est pas le cas des autres priorités. Néanmoins, les coûts sont représentés par des indicateurs comme « consommation de matières premières » ou « consommation d'énergie », et les délais sont visibles à travers des indicateurs comme « temps de cycle de la production des produits » ou « proportion de production retardée ». Par contre, le sujet de la flexibilité n'est pas vraiment traité.

Lindberg et al. ont proposé un ensemble d'indicateurs divisé en huit catégories (Lindberg et al., 2015) :

- Energie ;
- Matières premières ;
- Opérations ;

- Maintenance ;
- Planification ;
- Equipements ;
- Contrôle de la performance ;
- Inventaire ;
- Gestion des stocks.

Ces catégories ne reflètent pas immédiatement les priorités identifiées. Cependant, ces sujets sont traités par différents indicateurs répartis dans ces catégories. Les coûts sont principalement pris en compte avec les catégories « Energie », « Matières premières », ou encore avec des indicateurs d'autres catégories comme « ratio entre les coûts de maintenance et le volume de production sur une période donnée », appartenant à la catégorie « Maintenance ». De même, la qualité a sa propre catégorie (« Contrôle de la performance »), et se retrouve dans des indicateurs d'autres catégories, comme « pourcentage de produits de qualité complète sur une période donnée ». La priorité des délais est principalement visible dans les catégories « Opérations » et « Planification ». Elle est également prise en compte par d'autres indicateurs, à l'instar de « ratio entre les temps de maintenance et le volume de production sur une période donnée ». Comme pour l'article précédent, la flexibilité est moins traitée, mais se retrouve à travers quelques indicateurs comme « temps de mise en place après un changement de série ».

Un autre ensemble d'indicateurs pour les entreprises industrielles a été construit par Tokola et al., qui l'ont divisé en deux parties (Tokola et al., 2016) :

- *Les indicateurs de production*, avec la fiabilité des livraisons, la ponctualité des livraisons, le temps de cycle de la production, le temps de cycle entre la commande et la livraison, le taux d'utilisation des ressources, l'indice d'efficacité globale des équipements, la productivité de l'usine, la quantité produite et l'efficacité du système de production ;
- *Les indicateurs de qualité*, avec les réclamations des clients, la qualité des produits, quantité des produits de bonne qualité et la qualité des fournisseurs.

Comme précédemment, la qualité dispose de sa propre catégorie. Il y a de nombreux indicateurs traitant des délais dans les indicateurs de production, comme « ponctualité des livraisons » ou « temps de cycle de la production ». Les coûts sont reflétés par certains indicateurs, comme « taux d'utilisation des ressources » par exemple, ce qui n'est en revanche pas le cas de la flexibilité.

A partir de cette étude de littérature, nous avons sélectionné des indicateurs correspondant aux quatre priorités identifiées. Un effort a été mené lors de cette sélection pour éviter les doublons d'indicateurs entre les différents ensembles étudiés. Par exemple, l'indicateur « livraisons ponctuelles et fiables »

tiré de (Avella et al., 2001) est très proche de « ponctualité des livraisons » issu de (Tokola et al., 2016). Ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 51.

Priorités des entreprises industrielles	Indicateurs de performance
Coûts	Coûts à l'unité
	Efficacité globale des équipements
	Consommation des matières premières et de l'énergie
	Ratio entre la quantité produite et les coûts de maintenance
Flexibilité	Flexibilité de la production
	Vitesse d'introduction de nouveaux produits
	Flexibilité de la planification de la production
Qualité	Niveau de satisfaction des clients
	Qualité des services
	Pourcentage des produits de bonne qualité
Délais	Temps de cycle de la production
	Niveau de réalisation de la planification
	Ponctualité des livraisons

Tableau 51. Sélection d'indicateurs de performance des entreprises industrielles

Un ensemble d'indicateurs de performance ayant maintenant été établi, il était nécessaire d'étudier les bénéfices attendus lors de l'intégration de différentes technologies et les croiser avec ces indicateurs pour pouvoir en tirer des règles d'évolution. Pour illustrer ce processus, comme précédemment, les paragraphes suivants présentent les différentes étapes suivies avec l'exemple de la technologie ERP.

Différents bénéfices sont attendus lors de l'intégration d'un ERP. Dans leur article, Davenport et al. listent trois principaux avantages (Davenport et al., 2002): une réduction du temps de cycle de la production, une amélioration de la gestion de l'inventaire et une réduction des besoins en ressources physiques. La réduction du temps de cycle est également citée par Shang et Seddon, qui relèvent également une amélioration de la productivité, une amélioration de la qualité et une réduction globale des coûts (Shang & Seddon, 2000).

Pour Hawking et al., l'intégration d'un ERP devrait permettre à une entreprise d'obtenir des améliorations sur la productivité, sur la gestion des commandes et la ponctualité des livraisons, ainsi que des réductions des besoins de stocks, des besoins de maintenance et des besoins de transports (Hawking et al., 2004).

Sadrzadehrafiei et al. ont listé de nombreux bénéfices à attendre de la mise en place d'un ERP (Sadrzadehrafiei et al., 2013):

- Réduction des coûts des processus de qualité et de production ;
- Réduction des besoins de stocks ;
- Meilleure gestion des processus de production et de logistique ;
- Amélioration du processus de formation des équipes ;
- Plus grande flexibilité du processus de production ;
- Optimisation de l'utilisation des ressources ;
- Réduction des besoins en maintenance ;
- Réduction du temps d'arrêt des machines ;
- Amélioration de la planification de la production ;
- Réduction du temps de cycle de production ;
- Amélioration de la qualité, de la vitesse, de la précision et de la disponibilité des données au sein de l'entreprise.

Ces bénéfices potentiels pourraient être mesurés, lors de la mise en place dans une entreprise industrielle, en utilisant l'ensemble d'indicateurs de performance précédemment sélectionnés. Par exemple, l'un des bénéfices obtenus par l'intégration d'un ERP, cité par tous les articles étudiés, est la réduction du temps de cycle de production. Cela pourrait être mesuré par l'indicateur « temps de cycle de la production ». Ainsi, une règle prédictive a pu être déterminée : « **L'intégration d'un ERP devrait permettre d'obtenir des bénéfices sur les performances de délais, par la réduction du temps de cycle de la production** ». De la même manière, les bénéfices potentiels relevés dans la littérature ont été associés aux différents indicateurs de notre sélection, ce qui a donné des règles prédictives sur les bénéfices de l'intégration d'un ERP, présentés dans le Tableau 52.

Priorités des entreprises industrielles	Indicateurs de performance	Prédiction d'amélioration
Coûts	Coûts à l'unité	L'intégration d'un ERP devrait aider à réduire les coûts à l'unité

	Efficacité globale des équipements	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer l'efficacité globale des équipements
	Consommation des matières premières et de l'énergie	L'intégration d'un ERP devrait aider à la réduction de la consommation des matières premières et de l'énergie
	Ratio entre la quantité produite et les coûts de maintenance	L'intégration d'un ERP devrait aider à l'amélioration du ratio entre les coûts de maintenance et les quantités produites
Flexibilité	Flexibilité de la production	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer la flexibilité de la production
	Vitesse d'introduction de nouveaux produits	L'intégration d'un ERP devrait aider à accélérer l'introduction de nouveaux produits
	Flexibilité de la planification de la production	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer la flexibilité de la planification de la production
Qualité	Niveau de satisfaction des clients	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer le niveau de satisfaction des clients
	Qualité des services	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer la qualité des services
	Pourcentage des produits de bonne qualité	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer le pourcentage des produits de bonne qualité
Délais	Temps de cycle de la production	L'intégration d'un ERP devrait aider à réduire le temps de cycle de la production
	Niveau de réalisation de la planification	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer le niveau de réalisation de la planification

	Ponctualité des livraisons	L'intégration d'un ERP devrait aider à améliorer la ponctualité des livraisons
--	----------------------------	--

Tableau 52. Ensemble de prédictions d'amélioration pour la mise en place d'un ERP

Ces règles de prédiction d'amélioration pourraient être utilisées pour aider les entreprises à identifier la technologie ERP comme une technologie pertinente pour atteindre des objectifs d'amélioration sur une ou plusieurs des priorités identifiées. Par exemple, une entreprise cherchant à atteindre de meilleures performances sur l'indicateur « Niveau de réalisation de la planification » peut se voir recommander, par l'application de ces règles, l'intégration d'un ERP.

#### IV. Exemple d'utilisation

Afin d'illustrer l'exploitation de ces règles, les paragraphes suivants présentent l'exemple d'une entreprise industrielle souhaitant la mise en place d'une technologie transversale afin d'obtenir des gains de performance sur plusieurs priorités.

Cette entreprise, basée en Lorraine, est un équipementier automobile dont les effectifs sont d'environ 100 personnes. Elle considère ne pas mener de pratiques liées au développement de produits ou de processus. En effet, elle travaille uniquement à la réalisation de pièces dont les plans lui sont fournis. C'est pourquoi, dans la suite de ce paragraphe, les axes de conception ne sont pas traités.

Parmi les objectifs que l'entreprise souhaiterait atteindre, elle espère des gains sur **la réduction du temps de cycle de la production** ou sur **la réduction du coût de ses produits à l'unité** ainsi qu'une **amélioration de la flexibilité de son processus de production**. Par l'application de nos prédictions d'amélioration, on peut voir que la technologie ERP répond aux besoins de l'entreprise puisqu'elle devrait permettre des gains de performance sur l'ensemble des objectifs identifiés. Ainsi, une des technologies recommandées à l'issue de l'application de ces règles serait l'ERP.

Néanmoins, avant d'établir définitivement la recommandation d'un ERP, il est nécessaire d'établir si l'entreprise est prête à intégrer la technologie ERP. Pour cela, nous devons appliquer les règles de prérequis aux résultats que l'entreprise a obtenu après lui avoir appliqué notre modèle de maturité.

Le point de départ est donc de mesurer les niveaux de maturité de l'entreprise, qui sont présentés dans le Tableau 53 et la Figure 21. Pour réaliser ce diagnostic, un rendez-vous a été pris avec le dirigeant de l'entreprise, dans leurs locaux. Ce rendez-vous a duré environ une heure et demi, durant

lequel le dirigeant a répondu à nos questions pour établir les niveaux de maturité de l'entreprise sur les différents axes. Le protocole d'entretien suivi sera décrit plus en détail dans le chapitre 5.

Dimension	Axe	Pratiques	Niveau mesuré
Capacité à conduire le changement	Implication de la direction	Implication directe de la direction	Niveau 2
		Mise à disposition des ressources	Niveau 2
	Méthodologie de conduite du changement	Communication	Niveau 2
		Pratiques de gestion de projet	Niveau 2
Maturité des processus	Logistique	Gestion du stock et des réapprovisionnements	Niveau 3
		Logistique interne et approvisionnement de la production	Niveau 3
		Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs	Niveau 2
	Conception	Pratiques de conception	N/A
	Production	Planification de la production	Niveau 2
		Pilotage opérationnel et contrôle de la production	Niveau 3
	Maintenance	Gestion de la maintenance	Niveau 2
	Qualité	Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité	Niveau 3
		Pilotage opérationnel du processus qualité	Niveau 3
		Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité	Niveau 2
Maturité technologique	Logistique	Guidage des opérateurs logistique	Niveau 2
		Technologies pour le transport des pièces et produits	Niveau 1
		Technologies pour la gestion du magasin	Niveau 2
		Gestion des commandes clients	Niveau 2
		Gestion des commandes fournisseurs	Niveau 2
		Suivi et traitement des données de logistique	Niveau 2

		Technologies de suivi des pièces et matériaux	Niveau 1
	Conception	Réalisation des tests sur prototypes	N/A
		Représentation et modélisation des pièces et produits	N/A
		Capacités de conception collective	N/A
		Technologies dédiées au prototypage	N/A
		Virtualisation de pièces physiques	N/A
		Acquisition de données utilisateurs pour la conception	N/A
	Production	Planification de la production	Niveau 2
		Suivi et traitement des données de production	Niveau 2
		Guidage des opérateurs de production	Niveau 1
		Machines du système de production	Niveau 2
		Assistance et collaboration technologique	Niveau 1
	Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	Niveau 2
		Suivi des opérations de maintenance	Niveau 2
		Guidage des opérateurs de maintenance	Niveau 2
		Formation des opérateurs de maintenance	Niveau 2
	Qualité	Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité	Niveau 1
		Procédure de contrôle visuel de la qualité	Niveau 2
		Détection de défauts de production	Niveau 2

Tableau 53. Niveaux de maturité mesurés dans l'entreprise

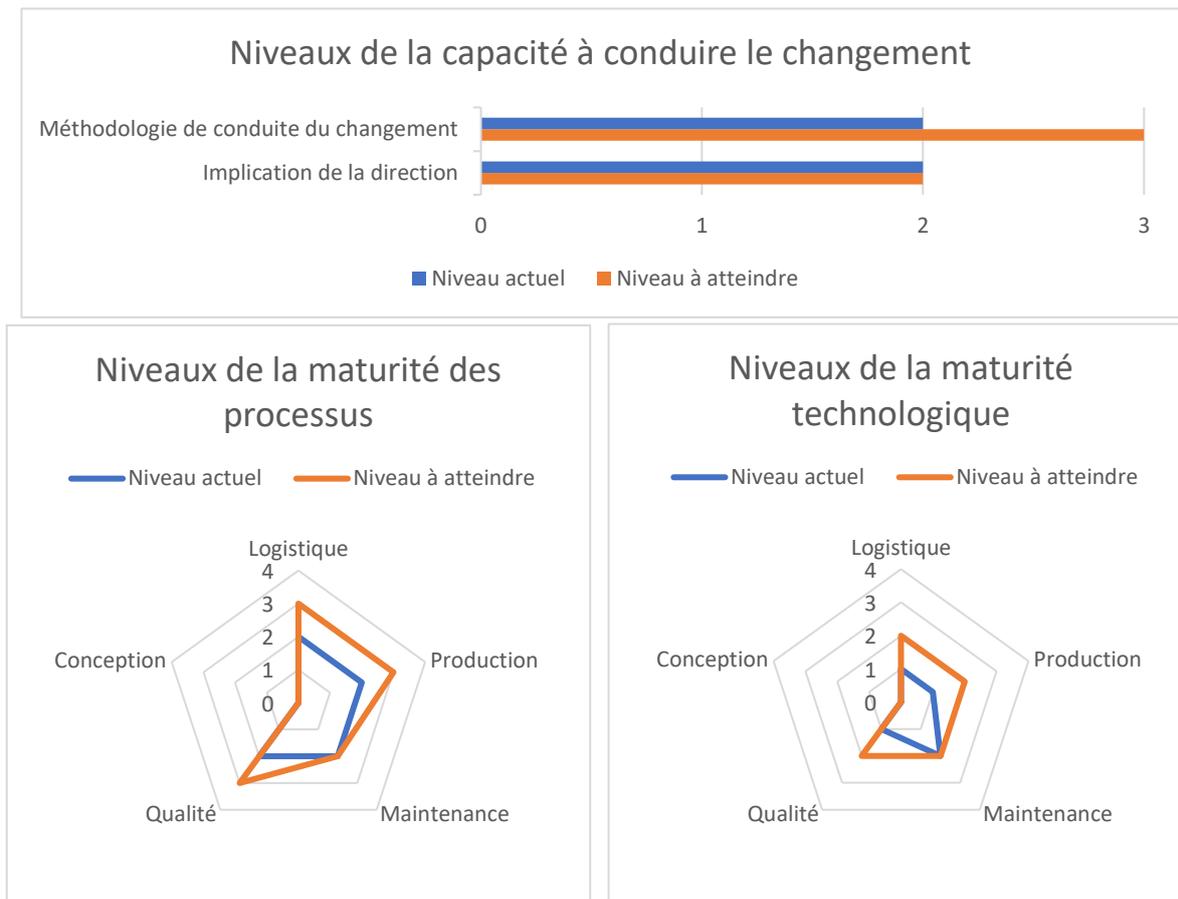


Figure 21. Niveaux de maturité actuels et à atteindre pour l'entreprise

Pour tous les axes du modèle où l'entreprise a atteint voire dépassé le niveau requis par les règles, il n'y a pas de modifications et l'entreprise est encouragée à s'intéresser directement à la mise en place de l'ERP. Par exemple, les pratiques de l'axe « Implication de la direction », mesurées au niveau 2, sont suffisantes pour correspondre aux prérequis, de même que l'axe « Maintenance » de la dimension « Maturité des processus ». Dans ces cas, l'entreprise n'aura pas à mettre en place d'actions supplémentaires pour pouvoir mener la mise en place des technologies proposées.

A l'inverse, pour tous les axes où l'entreprise n'atteint pas le niveau minimum recommandé par les règles de prérequis, la recommandation de mise en place de l'ERP sera associée à une recommandation de progresser sur les axes concernés, afin d'assurer une meilleure intégration de cette nouvelle technologie. Dans notre cas, on peut relever différentes pratiques dont les niveaux sont insuffisants au regard de nos règles de prérequis. Par exemple, dans la dimension « Capacité à conduire le changement », les pratiques de communication et de gestion de projet sont mesurées au niveau 2, là où les prérequis demandent qu'elles soient au niveau 3. De même, on a repéré des pratiques de la

dimension « Maturité des processus » et des fonctions de la dimension « Maturité technologique » qui n'atteignent pas les niveaux requis. Dans ce cas, on recommande à l'entreprise de d'abord faire progresser les pratiques concernées avant de s'intéresser au déploiement de leur nouvelle technologie. Ce n'est qu'une fois les améliorations en place que l'entreprise sera encouragée à acquérir et intégrer son ERP (Tableau 54).

<b>Dimension</b>	<b>Axes</b>	<b>Pratiques à améliorer</b>	<b>Niveau mesuré</b>	<b>Niveau à atteindre</b>
Capacité à conduire le changement	Méthodologie de conduite du changement	Communication	Niveau 2	Niveau 3
		Pratiques de gestion de projet	Niveau 2	Niveau 3
Maturité des processus	Logistique	Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs	Niveau 2	Niveau 3
	Production	Planification de la production	Niveau 2	Niveau 3
	Qualité	Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité	Niveau 2	Niveau 3
Maturité technologique	Logistique	Technologies pour le transport des pièces et produits	Niveau 1	Niveau 2
		Technologies de suivi des pièces et produits	Niveau 1	Niveau 2
	Production	Guidage des opérateurs de production	Niveau 1	Niveau 2
		Assistance et collaboration technologique	Niveau 1	Niveau 2
	Qualité	Importation et traitement des données	Niveau 1	Niveau 2

		pour le suivi de la qualité		
--	--	--------------------------------	--	--

Tableau 54. Pratiques à améliorer pour l'intégration d'un ERP

Une fois ces améliorations menées, l'entreprise sera en position pour mener le processus d'intégration de la technologie ERP.

## V. Conclusion

Deux questions ont été posées en début de chapitre pour établir comment utiliser les résultats issus du modèle de maturité. La première s'intéressait aux moyens de s'assurer que l'entreprise puisse correctement mettre en place les progrès qu'elle souhaite déployer. La seconde se penchait sur les bénéfices à attendre des différentes technologies pouvant être intégrées afin que l'entreprise puisse anticiper des résultats et faire des choix éclairés.

Pour s'assurer que l'entreprise puisse correctement mettre en place les technologies recommandées, nous avons établi des règles de prérequis, en termes de bases technologiques, de pratiques organisationnelles ou de pratiques de conduite du changement. Si l'entreprise n'atteint pas tous les prérequis, elle se verra conseillée d'y remédier en plus de la recommandation technologique.

Afin de répondre à la seconde question, nous avons d'abord identifié différents indicateurs de performance des entreprises industrielles. Ensuite, nous avons construit une base pour développer des règles de prédictions des bénéfices obtenus par différentes technologies, ce que nous avons illustré avec l'exemple de l'ERP. Ces règles peuvent servir à construire des recommandations plus adaptées et mieux renseigner les entreprises et les aider à faire leurs choix.

Ces deux ensembles de recommandations permettent de se baser sur les résultats qu'une entreprise obtient à l'aide du modèle de maturité pour lui fournir des recommandations adaptées à sa situation propre. Afin de fournir le meilleur accompagnement aux entreprises, il est maintenant nécessaire de déterminer comment établir des priorités entre les différentes recommandations obtenues. Cette étape sera détaillée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 4

---

# Construction du système de préconisations pour l'établissement de priorités

---

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>115</b>
<b>II.</b>	<b>PRESENCE DE PRATIQUES DE CONCEPTION.....</b>	<b>115</b>
<b>III.</b>	<b>TYPLOGIES DE PRODUCTION.....</b>	<b>116</b>
<b>IV.</b>	<b>METHODE POUR LE CALCUL D'UN SCORE D'IMPORTANCE DES DIFFERENTS AXES.....</b>	<b>121</b>
<b>V.</b>	<b>ALGORITHME POUR LA PRIORISATION DES DIMENSIONS.....</b>	<b>123</b>
<b>VI.</b>	<b>EXEMPLE D'UTILISATION.....</b>	<b>126</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>128</b>

## I. Introduction

Une fois le modèle de maturité et les règles d'évolution appliquées, les entreprises accompagnées se voient proposer un nombre important d'actions possibles pour faire évoluer leur dispositif technologique. Cependant, il peut être difficile pour elles à cette étape de déterminer un plan d'actions pour exploiter les résultats obtenus. En particulier, l'établissement d'une stratégie peut être difficile pour les PME (Masood & Sonntag, 2020; Mittal et al., 2018). Ces entreprises plus modestes ont plus de mal à construire une stratégie, de par leurs moindres connaissances aux technologies ou leurs ressources plus limitées. C'est pourquoi il est important de fournir aux entreprises accompagnées des éléments les aidant à construire une démarche d'évolution adaptée à leur situation propre.

Afin de mieux adapter les actions recommandées auprès des entreprises, différents éléments différenciants ont d'abord été identifiés, utilisables pour mettre en place des personnalisations. En premier lieu, nous avons choisi d'observer la présence ou non de pratiques de conceptions. Ensuite, pour différencier plus précisément, nous avons étudié le fonctionnement des entreprises industrielles en fonction de leur manière de produire. Cela fait, nous avons établi les différentes importances des axes de notre modèle de maturité pour les entreprises, en fonction de leur manière de produire. Enfin, nous avons construit un algorithme pour établir des priorités d'actions et une méthode pour calculer un score d'importance des différents axes pour proposer un classement des actions recommandées. Cette démarche est l'objet de ce chapitre.

## II. Présence de pratiques de conception

Un premier point pour intégrer les particularités de l'entreprise auditée est le fait de déterminer si elle dispose de pratiques de conception ou non. Il a effectivement été observé que, contrairement aux autres axes du modèle de maturité, toutes les entreprises consultées n'en disposent pas. C'est un point particulier à cet axe, puisque les entreprises industrielles disposent par contre toutes d'activités de production, de logistique, de qualité et de maintenance, même s'ils ne sont pas forcément l'objet de processus formalisés. Cette spécificité du processus de conception a également été souligné par les experts interrogés. Par exemple, des compagnies faisant partie de grands groupes peuvent se voir fournir uniquement des pièces à produire avec toutes les phases de conception réalisées en amont par une autre entité du groupe. C'est également le cas de l'entreprise étudiée dans le chapitre précédent. La phase d'audit devra donc intégrer un moyen de déterminer si l'entreprise dispose de ces pratiques ou non. Dans ce dernier cas, l'axe « Conception » ne sera plus pris en compte dans la suite du diagnostic.

Nous avons ainsi établi une première manière de distinguer les industries. Un autre point pour différencier les entreprises et identifier leurs particularités est leur processus de production, ce qui est l'objet de la section suivante.

### III. Typologies de production

Afin de nous assurer de fournir les recommandations les plus justes possibles aux entreprises accompagnées, il est important de pouvoir intégrer différents modèles d'entreprises industrielles. Cela répond à l'importance de la prise en compte de la spécificité des entreprises soulignés par certains modèles de maturité (Colli et al., 2019). Nous avons alors choisi de nous intéresser à la manière de produire dans les sociétés industrielles.

Le modèle présenté dans le livre « Engineering Design » souligne les différences entre un système de production réalisant des pièces uniques, un réalisant des petites séries et un réalisant des grandes séries (Pahl et al., 2007). Trois différentes méthodes de production sont également relevées dans le livre « Manufacturing processes » (Kaushish, 2010) : production d'unités, ce qui peut être assimilé à celle de pièces uniques ; production par lots, pouvant correspondre à la réalisation de petites séries ; production de masse comparable à la réalisation de grandes séries.

Dans leur article, Nemetz et Fry relèvent également trois typologies (Nemetz & Fry, 1988): la production de pièces uniques et de petites séries, qui sont ici considérées comme une même typologie ; la production de masse ; la production en continu, qui d'après eux, concerne des produits bruts comme les produits chimiques, les boissons ou l'essence.

En 1999, Kalagnanam et Lindsay proposent une comparaison entre quatre systèmes de production (Kalagnanam & Lindsay, 1999). Les deux premiers sont une production par unités pouvant être rapprochée de la réalisation de pièces uniques, et une production de masse dite « traditionnelle », proche d'un système de production en grandes séries. Il présente également une production par processus, comme les processus de coulée continue d'une fonderie par exemple et une production en « Juste-à-Temps » (*Just-In-Time*, JIT).

Dans un article de Miltenburg, on peut voir une classification des modes de production en fonction de deux paramètres : les volumes et la variété de produits d'un côté, et la disposition des unités de production et le flux des produits de l'autre (Miltenburg, 2001). Parmi les modes de production classés, on retrouve une production de produits uniques de très petits volumes qui semblent avoir des

caractéristiques comparables. Ensuite, une production par lots, qu'on peut rapprocher de la production en petite série. Puis une production caractérisée par de forts volumes et des chaînes de production, qu'on peut associer à la production de grande série. On retrouve la production en continu, mais aussi une nouvelle typologie nommée « One-Piece Flow » (OPF), nommée en français « flux unitaire » ou « pièce-à- pièce ». Cette méthode de production peut également être assimilée à la production en JIT (White, 1990), ou au concept de « personnalisation de masse » (Tseng et al., 2017).

De ces différents systèmes de production, quatre ont été sélectionnés, avec l'aide d'un expert de l'UIMM Lorraine. Tout d'abord, nous avons sélectionné la production par projets, qui regroupe les cas d'entreprises réalisant des pièces uniques ou de très petits volumes de produits.

**Définition** : la production par projets est caractérisée par des conceptions de produits qui changent à chaque commande et où les quantités sont faibles ou ne concernent qu'un seul produit (Dean et al., 2009; Tu et al., 2000)

La deuxième typologie que nous avons sélectionnée est la production en petites séries.

**Définition** : le système de production en petites séries permet de produire des volumes moyens d'une gamme de produits. La production en petites séries est définie comme la production d'un produit en petits lots par une série d'opérations, chaque opération étant généralement effectuée sur l'ensemble du lot avant que l'opération suivante ne soit lancée sur ce lot (Haider et al., 2007)

Nous avons également choisi d'intégrer la production en grandes séries.

**Définition** : La production de grandes séries est la réalisation de grands volumes d'un nombre défini de produits standardisés (Nemetz & Fry, 1988).

Enfin, la dernière typologie de production que nous avons sélectionnée est la production en personnalisation de masse, également nommé production en OPF.

**Définition** : La personnalisation de masse a pour but de fournir des produits et des services qui répondent le mieux aux besoins de clients individuels avec une efficacité proche de celle de la production de masse (Tseng et al., 1996, 2017)

La production en continue, bien que considérée comme différentes des typologies sélectionnées et ayant ses propres caractéristiques, n'a pas été sélectionnée. L'expert de l'UIMM Lorraine a jugé qu'elle ne devrait pas faire partie du cadre de notre étude, car ce type de production n'est que peu représenté parmi les entreprises de la région et il serait plus difficile d'obtenir des données à leur sujet. De plus, les contraintes de temps nous ont poussé à limiter le nombre de typologies choisies.

Nous avons ensuite cherché à établir un lien entre ces typologies de production et les processus industriels identifiés dans le chapitre 2. L'importance de la maîtrise de ces derniers ne semble pas être la même pour toutes les entreprises. Nemetz et Fry soulignent le fait que, en fonction de leur manière de produire, les entreprises font généralement des choix différents par rapport aux processus à favoriser (Nemetz & Fry, 1988). Par exemple, les entreprises réalisant des produits uniques ou des petits volumes se concentrent plus sur leurs processus de développement de nouveaux produits que celles travaillant sur une production de masse, qui accordent plus d'importance à la maîtrise et l'optimisation du processus de réalisation des produits. Un autre exemple est la flexibilité de la production. En effet, elle semble être plus importante pour une entreprise fonctionnant en OPF, impliquant une capacité à modifier les configurations de l'outil de production pour respecter les commandes, que pour une entreprise produisant des grandes séries, nécessitant bien moins de changements sur les lignes de production. Ces ordres de priorité ont pour but de permettre de classer les recommandations qui seront fournies à l'issue de l'application de l'outil de recommandation.

Ainsi, nous avons établi, pour chacune des typologies de production que nous avons identifiées un classement de la maîtrise des huit axes du modèle (Tableau 55). Ce classement a été établi avec l'aide d'un expert de l'UIMM Lorraine. Il traite huit axes, car il a été réalisé en même temps que la première version du modèle de maturité, avant l'entretien avec les experts.

	<b>Importance des pratiques</b>			
	OPF	G série	P série	Projet
<b>Pilotage/commande</b>	2e	4e	1e	7e
<b>Traçabilité</b>	6e	6e	8e	6e
<b>Gestion des flux</b>	3e	3e	2e	3e
<b>Fiabilité / qualité</b>	5e	1e	3e	5e
<b>Flexibilité</b>	1e	7e	4e	1e
<b>Maintenance</b>	4e	2e	7e	8e
<b>Organisation du travail</b>	7e	5e	5e	2e
<b>Conception</b>	8e	8e	6e	4e

Tableau 55. Première version de la priorité des pratiques en fonction de la typologie de production

Dans le même cadre que celui présenté dans le chapitre 2, nous avons interrogé notre panel de cinq experts sur le sujet des moyens que nous avons sélectionné pour identifier les spécificités des entreprises industrielles à accompagner. La sélection des experts pour ces entretiens avait pris en compte le sujet de la typologie de production, puisqu'un effort a été mené pour avoir au moins représentant de chacune de ces typologies au sein de la sélection (Tableau 56).

	<b>Domaine entreprise</b>	<b>Effectifs entreprise</b>	<b>Poste expert</b>	<b>Typologie de l'entreprise</b>
Expert n°1	Visserie	143 personnes	Responsable prospective et innovation	Petites séries
Expert n°2	Systèmes automatisés	44 personnes	Gérant	Production par projets
Expert n°3	Câbles industriels	261 personnes	Directeur technique	Grandes séries
Expert n°4	Systèmes de direction automobile	877 personnes	Senior manager engineering and smart manufacturing	OPF
Expert n°5	Equipementier automobile	100 personnes	Président Directeur Général	Grandes séries

Tableau 56. Profil des experts et de leurs entreprises pour la série d'entretiens

Cette partie de l'entretien s'est déroulée en trois phases :

- Suite à la présentation des différents axes du modèle, il leur a été demandé leur avis sur la présence systématique ou non de pratiques de conception ;
- Après une présentation, une par une, des quatre typologies de production retenues, il leur a été demandé de valider leur pertinence individuelle, et leur cohérence en tant qu'ensemble ;
- Après l'identification de la typologie de production à laquelle correspond l'entreprise de l'expert interrogé, il leur a été demandé de classer par ordre d'importance les axes du modèle pour eux.

Nous avons pu tirer plusieurs leçons de ces entretiens. Premièrement, comme indiqué dans le chapitre 2, les experts ont confirmé le fait que toutes les entreprises ne disposent pas de pratiques liées à un processus de conception.

Ensuite, le panel des quatre typologies de production identifiées est validé. Ces quatre profils devraient permettre, d'après les experts, de décrire la majorité des entreprises industrielles. Cependant, les définitions ont été discutées afin de mieux cerner les cadres de ces typologies. En effet, les termes de « volumes moyens » ou de « grands volumes » cités dans les définitions ont été jugés comme insuffisamment précis. Il pourrait donc être difficile pour certaines entreprises de déterminer leur profil en se basant uniquement sur ces éléments. C'est pourquoi nous avons construit une démarche de caractérisation pour les aider à identifier plus facilement leur typologie (Figure 22). Nous avons utilisé les retours collectés lors de ces entretiens pour construire cette démarche. Les experts nous ont indiqués qu'il arrive que des entreprises puissent se retrouver dans la situation de deux typologies, comme par exemple la réalisation de produits en grandes et en petites séries. Néanmoins, dans ce genre de cas, une des typologies est généralement plus importante et ses contraintes plus prégnantes que l'autre. C'est pourquoi nous avons fait le choix de considérer qu'une entreprise industrielle ne peut se trouver que dans une seule de ces catégories durant notre étude. La catégorie identifiée durant les phases d'audit peut aussi également prendre en compte, dans ce genre de cas, le projet de transformation de l'entreprise, si cette dernière souhaite faire évoluer ses capacités pour une de ses typologies de production en particulier.

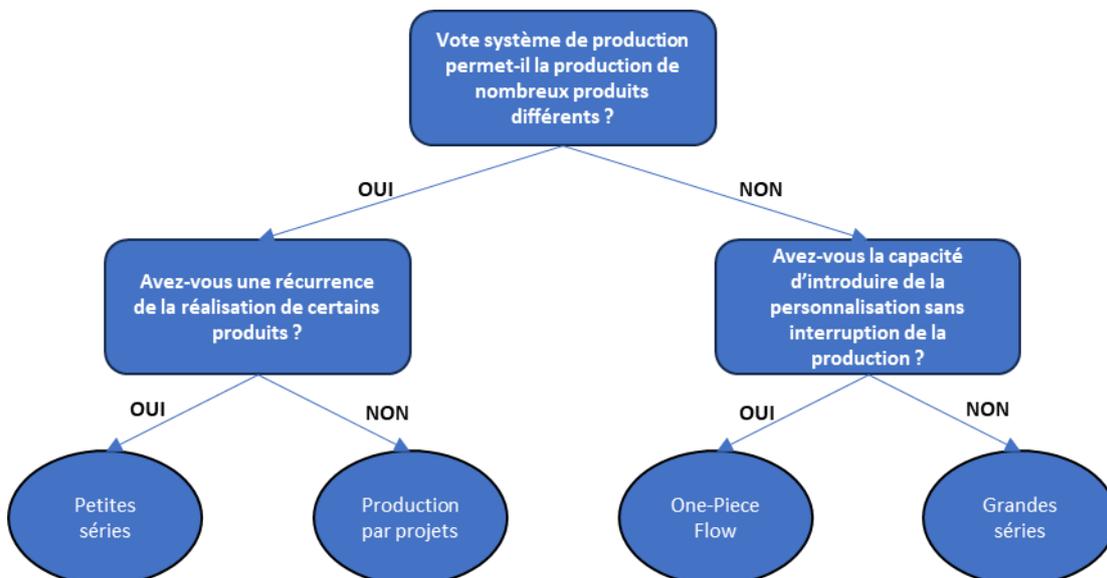


Figure 22. Caractérisation des typologies de production

Il n'a pas été possible, lors de ces entretiens, de valider les classements des processus industriels en fonction de la typologie de production des entreprises. En effet, comme notre ensemble d'axes des dimensions de maturité des processus et de maturité technologique a été remis en cause par les experts (cf. Chapitre 2), nous n'avons pas pu évaluer la pertinence du classement de ces derniers. A la suite de ces entretiens, nous avons redéfini la liste des processus industriels constituant les axes de notre modèle, ce qui est décrit dans le chapitre 2. Ensuite, nous avons recontacté l'expert avec qui nous avons établi le premier classement d'importance, et refait le même travail avec notre nouvel ensemble d'axes. Nous avons ainsi établi un nouveau classement des priorités en fonction de la typologie de production des entreprises.

	Importance des pratiques			
	OPF	G série	P série	Projet
<b>Production</b>	1e	4e	1e	4e
<b>Logistique</b>	2e	3e	2e	1e
<b>Qualité</b>	4e	1e	3e	3e
<b>Maintenance</b>	3e	2e	5e	5e
<b>Conception</b>	5e	5e	4e	2e

Tableau 57. Deuxième version des priorités des pratiques en fonction de la typologie de production

#### IV. Méthode pour le calcul d'un score d'importance des différents axes

Les résultats du modèle de maturité fournissent de nombreuses actions d'améliorations possible, pour tous les axes des dimensions de maturité technologique et de maturité des processus de notre modèle. Il est donc nécessaire d'établir une méthode pour permettre aux entreprises de faire des choix car il ne leur sera probablement pas possible de toutes les mettre en place en même temps.

Dans le paragraphe précédent, nous avons établi un classement des priorités dépendant de la manière de produire des entreprises industrielles. Maintenant, la question est de savoir comment exploiter ces données pour donner aux entreprises accompagnées les informations nécessaires pour établir leur propre feuille de route pour leur évolution technologique.

Un autre aspect à prendre en compte pour établir des priorités est le niveau des entreprises mesuré sur les différents axes du modèle de maturité. D'après Clarke et Manton, il est préférable de privilégier

d'obtenir un équilibre entre le niveau des différents axes, et donc de d'abord se concentrer sur les axes où le niveau est le plus faible (Clarke & Manton, 1997). Cette priorisation des éléments les plus faibles par rapport aux plus avancés a également été choisie par Benjamin Dethine dans son outil d'accompagnement à l'évolution numérique des entreprises (Dethine, 2023).

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons choisi de construire un calcul du score d'importance pour chaque axe. Pour établir le fonctionnement de ce calcul, nous nous sommes inspirés du calcul présenté par Schumacher et al. pour leur calcul du niveau de maturité des dimensions de leur modèle, qui intègre des facteurs d'importance d'éléments. D'abord, pour prendre en compte le niveau actuel de maturité technologique de l'entreprise, mais aussi s'assurer que le score d'importance mette en avant les axes dont le niveau est le plus faible nous avons choisi d'intégrer à notre calcul la différence entre le niveau maximum atteignable (à savoir le niveau 4) et le niveau effectivement mesuré au sein de l'entreprise. Pour que la typologie de production soit prise en compte, nous avons choisi d'associer le classement des axes avec un poids qui est multiplié à la différence déterminée précédemment. Plus l'axe est jugé prioritaire, plus il est associé à un poids important (Tableau 58). Ainsi, un axe classé premier est associé à un poids de 1,2, et au contraire un axe classé dernier est associé à un poids de 0,8. Par exemple, l'axe « Logistique » est classé deuxième pour la typologie « Petite série » et sera donc associé à un facteur d'importance de 1,1.

	<b>Facteurs d'importance</b>			
	OPF	G série	P série	Projet
<b>Production</b>	1,2	0,9	1,2	0,9
<b>Logistique</b>	1,1	1	1,1	1,2
<b>Qualité</b>	0,9	1,2	1	1
<b>Maintenance</b>	1	1,1	0,8	0,8
<b>Conception</b>	0,8	0,8	0,9	1,1

Tableau 58. Poids des axes en fonctions de la typologie de production

Ainsi, pour calculer l'importance d'un axe pour une entreprise, on fait la différence entre le niveau mesuré et le niveau maximum, et on multiplie le résultat par le poids de l'axe, défini en fonction de la typologie de production de l'entreprise. On a donc un calcul se présentant ainsi :

$$\text{Pour l'axe } i : S_i = (Nm_i - Na_i) \times F_i$$

Où :

- $S_i$  est le score d'importance de l'axe  $i$
- $Nm_i$  est le niveau maximum de maturité technologique de l'axe  $i$
- $Na_i$  est le niveau actuel de maturité technologique de l'axe  $i$
- $F_i$  est le facteur d'importance de l'axe  $i$

Une fois les scores d'importance établis pour les cinq axes du modèle, ils peuvent être comparés pour établir un classement de priorité de ces axes. Celui dont le score est le plus haut est présenté comme le plus prioritaire. Ainsi l'entreprise se voit présenter non seulement des actions à mettre en place, mais également un ordre d'importance, l'aidant ainsi à faire ses choix.

Par exemple, une entreprise dont la typologie de production est une production « par projets », dont le niveau de maturité technologique de l'axe « maintenance » (considéré comme 5<sup>e</sup> dans le classement d'importance pour cette typologie de production) est mesuré à 1, recevra comme score d'importance pour cet axe :

$$S_{\text{maintenance}} = (4 - 1) \times 0,8 = 2,4$$

## V. Algorithme pour la priorisation des dimensions

Comme nous l'avons établi lors de la détermination des dimensions de notre modèle 2MTI (*Maturity Model for Technological Integration*) ainsi que dans le chapitre précédent, les dimensions de maturité des processus et la capacité à conduire le changement doivent être à un niveau suffisamment élevé avant la mise en place de nouvelles technologies pour que cette dernière se passe dans les meilleures conditions. Afin de formaliser ces priorités, nous avons choisi d'établir un algorithme basé sur des seuils de niveau. En se basant sur les règles de prérequis déterminées précédemment, nous avons déterminé une règle générale pour la comparaison, pour chaque axe, des niveaux de maturité des processus et de maturité technologique : si le niveau de maturité des processus ne dépasse pas strictement le niveau de maturité technologique, alors les recommandations sur cet axe doivent prioriser la progression sur les pratiques de maturité des processus. Par contre, si le niveau de maturité des processus est effectivement strictement supérieur au niveau de maturité technologique, alors, les recommandations peuvent encourager une

intégration technologique permettant à l'entreprise de gagner un niveau de maturité technologique. Cela s'est traduit par l'algorithme ci-dessous :

Pour l'axe  $i$ ,

Si  $MP_i \leq MT_i$ ,

Alors : Dimension de maturité des processus prioritaire pour l'axe  $i$

Sinon : Dimension de maturité technologique prioritaire pour l'axe  $i$

Où :

- $MP_i$  est le niveau de maturité des processus mesuré pour l'axe  $i$
- $MT_i$  est le niveau de maturité technologique mesuré pour l'axe  $i$

Par exemple, si, pour l'axe « Production », le niveau de maturité des processus d'une entreprise est 2 et son niveau de maturité technologique est 3, alors la recommandation de technologies permettant à cette entreprise de progresser en maturité technologique sera précédée de recommandations pour d'abord progresser sur ses pratiques de maturité des processus. A l'inverse, si cette entreprise a, pour l'axe « Conception », un niveau de maturité des processus à 3 et un niveau de maturité technologique à 1, alors elle sera considérée comme prête et encouragée à faire progresser ses fonctions technologiques.

La dimension de capacité de conduite du changement est également considérée comme prioritaire à la dimension technologique, quel que soit les axes. Lorsque qu'un axe de la maturité technologique est au niveau 3, il sera nécessaire que les axes de la capacité de conduite du changement soient au niveau 3 pour que l'entreprise se voit proposer de progresser sur la dimension technologique. Si ce n'est pas le cas, il lui sera suggéré qu'elle progresse d'abord sur ses pratiques de conduite du changement. Si le niveau le plus bas des axes de conduite du changement est 2, les recommandations de progrès sur la maturité technologique ne seront prioritaires que sur les axes dont le niveau sera inférieur ou égal à 2. Cela s'est traduit par l'algorithme ci-dessous :

Pour l'axe  $i$ ,

Si  $CC = 3$ ,

Alors : Dimension de maturité technologique prioritaire pour l'axe  $i$

Sinon : Si  $CC = 2$

Alors : Si  $MT_i \leq 2$

Alors : Dimension de maturité technologique prioritaire pour l'axe  $i$

Sinon : Dimension de capacité à conduire le changement prioritaire  
pour l'axe  $i$

Sinon : Dimension de capacité à conduire le changement prioritaire pour l'axe  $i$

Où :

- $CC$  est le niveau mesuré le plus faible des deux axes de la dimension de capacité de conduite du changement
- $MT_i$  est le niveau de maturité technologique mesuré pour l'axe  $i$

Par exemple, si le niveau mesuré le plus bas parmi axes de la capacité à conduire le changement d'une entreprise est 2, seuls les axes de maturité technologique dont le niveau est mesuré à 1 ou 2 seront associés directement à des recommandations pour faire progresser la maturité technologique. Pour ceux dont le niveau sera mesuré à 3, il sera d'abord recommandé de faire progresser les pratiques de conduite du changement avant de chercher à améliorer le système technologique de l'entreprise.

Les deux algorithmes sont menés de manière parallèle. La dimension de maturité technologique est toujours moins prioritaire que les deux autres, mais il n'y a pas de différence de priorité entre les deux autres. Il y a donc, pour chacun des axes, trois cas possibles :

- Si les deux algorithmes indiquent de travailler sur la maturité technologique, alors il s'agit effectivement des recommandations mises en avant
- Si un des algorithmes indiquent la maturité technologique mais que l'autre indique une des autres dimensions, alors c'est cette dernière qui est mise en avant
- Si aucun des deux algorithmes n'indiquent la maturité technologique, alors les deux dimensions indiquées (maturité des processus et capacité de conduite du changement) sont également prioritaires

## VI. Exemple d'utilisation

Afin d'illustrer la démarche de priorisation des actions, les paragraphes suivants présentent l'exemple d'une entreprise industrielle. Il s'agit ici d'une entreprise fictive. Néanmoins, cette démarche sera également présentée durant les expérimentations auprès d'entreprises adhérentes de l'UIMM Lorraine, qui sont l'objet du chapitre suivant.

La première étape consiste à identifier la typologie de production de l'entreprise. En posant les questions identifiées dans le paragraphe 3, il est possible de déterminer cette dernière, qui est la production en « petites séries » pour cet exemple. Durant cette étape, il est également nécessaire de valider la présence ou non de pratiques de conception, ce qui est le cas dans notre exemple.

Ensuite, on évalue les pratiques de l'entreprise sur les trois dimensions du modèle pour mesurer les niveaux de maturité. Les résultats pour cet exemple sont présentés dans le Tableau 59.

Dimension	Axe	Niveau mesuré
Capacité de conduite du changement	Implication de la direction	Niveau 2
	Méthodologie de conduite du changement	Niveau 2
Maturité des processus	Logistique	Niveau 3
	Conception	Niveau 2
	Production	Niveau 2
	Maintenance	Niveau 1
	Qualité	Niveau 2
Maturité technologique	Logistique	Niveau 2
	Conception	Niveau 2
	Production	Niveau 3
	Maintenance	Niveau 3
	Qualité	Niveau 2

Tableau 59. Niveau de maturité de l'entreprise exemple

Maintenant que les niveaux de maturité sont mesurés et la typologie de production évaluée, l'étape suivante est de calculer les scores d'importance des différents axes. Pour cela, on applique le calcul

présenté dans la partie 4 de ce chapitre. Une fois ces scores d'importances calculés pour chaque axe, ces derniers sont classés dans le Tableau 60.

Rang	Axes	Score d'importance
1 <sup>e</sup>	Logistique	2,2
2 <sup>e</sup>	Qualité	2
3 <sup>e</sup>	Conception	1,8
4 <sup>e</sup>	Production	1,2
5 <sup>e</sup>	Maintenance	0,8

Tableau 60. Classement des axes de l'exemple et leur score d'importance

On peut voir que les processus indiqués comme prioritaires sont bien ceux dont le niveau de maturité technologique est le plus faible (Logistique, Qualité et Conception). De plus, les axes dont les niveaux de maturité technologique sont égaux sont différenciés grâce au facteur d'importance déterminé grâce à la typologie de production de l'entreprise.

Ensuite, les algorithmes sont appliqués pour chacun des axes, pour déterminer, pour chaque axe, quelles dimensions doivent être privilégiées (Tableau 61).

Rang	Axe	Algorithme Techno/Process	Algorithme Techno/Conduite changement	Résultat final
1 <sup>e</sup>	Logistique	Maturité technologique	Maturité technologique	<b>Maturité technologique</b>
2 <sup>e</sup>	Qualité	Maturité des processus	Maturité technologique	<b>Maturité des processus</b>
3 <sup>e</sup>	Conception	Maturité des processus	Maturité technologique	<b>Maturité des processus</b>
4 <sup>e</sup>	Production	Maturité des processus	Capacité de conduite du changement	<b>Maturité des processus + Capacité de conduite du changement</b>

5 <sup>e</sup>	Maintenance	Maturité des processus	Capacité de conduite du changement	<b>Maturité des processus + Capacité de conduite du changement</b>
----------------	-------------	------------------------	------------------------------------	--

Tableau 61. Dimensions à privilégier pour chaque axe de l'exemple

Ainsi, dans cet exemple, la préconisation principale que l'entreprise reçoit est de faire progresser ses pratiques technologiques sur l'axe « Logistique ». Le deuxième axe à favoriser est l'axe « Qualité », mais l'entreprise devrait d'abord faire progresser ses processus avant de passer à l'intégration de nouvelles technologies sur cet axe.

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à développer une démarche pour prioriser les actions d'évolution que les entreprises accompagnées pourraient mettre en œuvre. Pour ce faire, nous avons établi une méthode de calcul pour prioriser les axes de notre modèle sur lesquels l'entreprise devrait progresser en priorité, en fonction de sa typologie de production et de ses résultats auprès de notre modèle de maturité. Ensuite, nous avons déterminé des algorithmes indiquant, pour chaque axe, la dimension dont le niveau doit être amélioré en premier.

La démarche de priorisation ainsi formulée, l'étape suivante consiste à mettre en application nos travaux de recherche. Une série d'expérimentations a donc été menée sur le terrain, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre 5

---

## Expérimentations via des cas d'études

---

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>130</b>
<b>II.</b>	<b>PROCESSUS D'ENTRETIEN.....</b>	<b>130</b>
<b>III.</b>	<b>PREMIER CAS D'ETUDES.....</b>	<b>132</b>
<b>IV.</b>	<b>DEUXIEME CAS D'ETUDES.....</b>	<b>135</b>
<b>V.</b>	<b>TROISIEME CAS D'ETUDES.....</b>	<b>138</b>
<b>VI.</b>	<b>RETOURS DES EXPERIMENTATIONS.....</b>	<b>142</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>144</b>

## I. Introduction

Les chapitres précédents ont décrit la démarche de construction de notre modèle de maturité 2MTI, ainsi que des méthodes pour en exploiter les résultats et fournir des préconisations priorisées pour aider les entreprises à faire évoluer leurs dispositifs technologiques. L'objectif de ce chapitre est de confronter nos contributions à des cas réels sur le terrain, pour en valider les résultats.

Ces cas réels sont des entreprises industrielles de Lorraine, adhérentes à l'UIMM Lorraine. Les expérimentations se font via des entretiens avec les dirigeants de ces entreprises ou des responsables avec une connaissance suffisante des processus et du système technologique de l'entreprise. Le modèle 2MTI est directement appliqué durant ces entretiens, qui sont suivis par une phase d'échange ouvert sur les différents éléments de notre outil et des résultats qui en sont issus.

La première section présente le processus d'entretien. Les paragraphes suivants décriront les différents cas, avec le profil des entreprises, leurs résultats, ainsi que les retours de ces entreprises.

## II. Processus d'entretien

Pour mener ces entretiens, nous avons suivi une démarche formalisée en plusieurs étapes. Pour cela, nous nous sommes basés sur le processus présenté par Benjamin Dethine dans sa thèse (Dethine, 2023): d'abord, une prise de contact pour fixer le rendez-vous ; ensuite, une préparation de l'entretien, via la construction d'un prototype d'outil ; puis, le déroulement de l'entretien lui-même ; enfin, un compte-rendu post -entretien, pour présenter les résultats de l'outil et collecter des retours (Figure 23).

Pour commencer, une prise de contact a eu lieu auprès de différentes entreprises industrielles, sélectionnées au sein des adhérents de l'UIMM Lorraine. Le principal critère de sélection a été la typologie de production supposée, afin de chercher à avoir une diversité des profils dans le panel. Ainsi, il nous sera possible de tester les différents profils identifiés dans nos travaux précédents. Cette prise de contact s'est fait par mail, présentant le sujet, les travaux en cours et les objectifs de notre étude. Suite à cela, un rendez-vous était fixé, pour un entretien d'environ deux heures. Les entretiens se sont faits par visioconférence, bien que les rencontres en présentiel étaient également une option proposée.

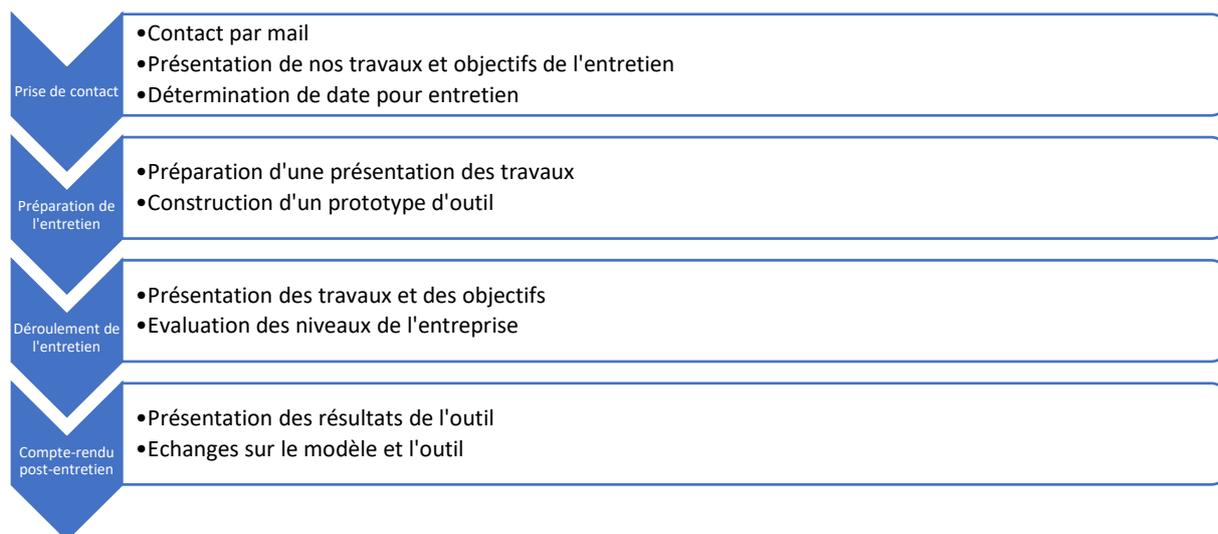


Figure 23. Démarche suivie pour les entretiens

En amont des entretiens, une présentation de nos travaux a été préparée, afin de donner du contexte à nos interlocuteurs et leur présenter nos travaux et nos objectifs. Pour mener les expérimentations et recueillir les réponses des entreprises interrogées, un prototype de notre outil a été construit sur Microsoft Excel. Ce prototype reprend les différents éléments que nous avons développés (modèle de maturité, typologie de production, algorithme de priorisation, ...). Ce support permet de mener plus facilement les entretiens, d'obtenir plus rapidement et de présenter plus clairement les résultats de l'entreprise suite à leurs réponses.

Les entretiens ont suivi une procédure établie en amont (Figure 24). Ils ont démarré par la présentation des différentes personnes prenant part à l'entretien, puis par la présentation de nos travaux et des objectifs de l'entretien. Ensuite, des questions d'introduction sur l'entreprise ont été posées, afin de mieux cerner son profil (produits, effectifs, ...). Puis le prototype de notre outil est lancé et la personne interviewée répond aux différentes questions, en plusieurs phases. Tout d'abord, les questions définies à la suite des interviews d'experts permettent l'identification de la typologie de production de l'entreprise (cf. chapitre 4). Ensuite, les trois phases de questions permettent d'identifier le positionnement de cette dernière sur les grilles de maturité de notre modèle. Durant ces phases, les niveaux des grilles de maturité sont décrits et comparés au fonctionnement de l'entreprise. Les différentes remarques des interlocuteurs sont également notées, afin de conserver leurs opinions sur le modèle ou l'outil.

Enfin, une phase post-entretien est menée, qui commence par la présentation des résultats issus de notre outil, présentant les niveaux et le positionnement de l'entreprise, ainsi que les priorités et des propositions d'actions. Une discussion a ensuite lieu, afin de collecter les retours des interlocuteurs sur le modèle, sur l'outil et les résultats de son application.

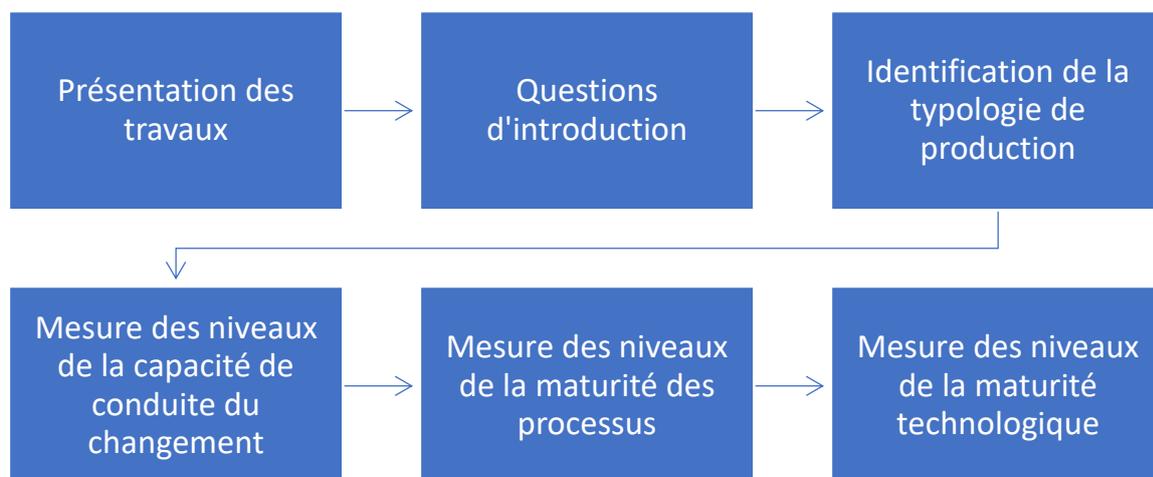


Figure 24. Procédure suivie pour le déroulement des entretiens

### III. Premier cas d'études

Le premier cas d'étude est un équipementier automobile, travaillant sur la réalisation de sièges pour des voitures ou des véhicules utilitaires. Il fait partie d'un grand groupe, mais nous avons uniquement traité le site de production basé en Meurthe-et-Moselle. Ce dernier est doté d'un effectif d'environ 100 personnes. Afin de pouvoir travailler avec ses clients de l'industrie automobile, il suit des standards de qualité importants qui lui imposent de fortes contraintes sur ce sujet ainsi qu'une formalisation et une certaine maîtrise de l'ensemble de ses processus. Cependant, il ne dispose pas de processus de conception, car ces tâches sont réalisées par d'autres entités du groupe. Nous avons mené l'entretien auprès du responsable de production. Ce dernier a précédemment été responsable méthodes dans la même entreprise. Ainsi, il a acquis une connaissance large des processus et du système technologique de l'entreprise.

Par rapport à sa typologie de production, cette entreprise a indiqué que le système de production est centré sur un ensemble restreint de produits différents (réponse « non » à la question « Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ? »). Néanmoins, ce système permet tout de même de personnaliser des éléments à ces produits, et ce individuellement pour chaque pièce (réponse « oui » à la question « Avez-vous la capacité d'introduire de la personnalisation

sans interruption de la production ? »). Ainsi, nous avons pu identifier leur typologie de production comme étant du type « One-Piece Flow ».

Les résultats mesurés de l'entreprise sont présentés dans la Figure 25. Les pratiques de conduite du changement sont bien implantées au sein de l'entreprise, même s'il reste une marge de progression. Leur maturité des processus est très haute sur les axes de processus et de maintenance (niveau 4), mais moins sur ceux de qualité ou de logistique (niveau 2). C'est sur l'axe de qualité que le niveau de maturité technologique de l'entreprise est le plus haut (niveau 3). Son niveau est plus bas sur les axes de production (niveau 2), de logistique et de maintenance (niveau 1). Le détail des réponses et des niveaux mesurés dans l'entreprise sont présentés dans l'annexe A.

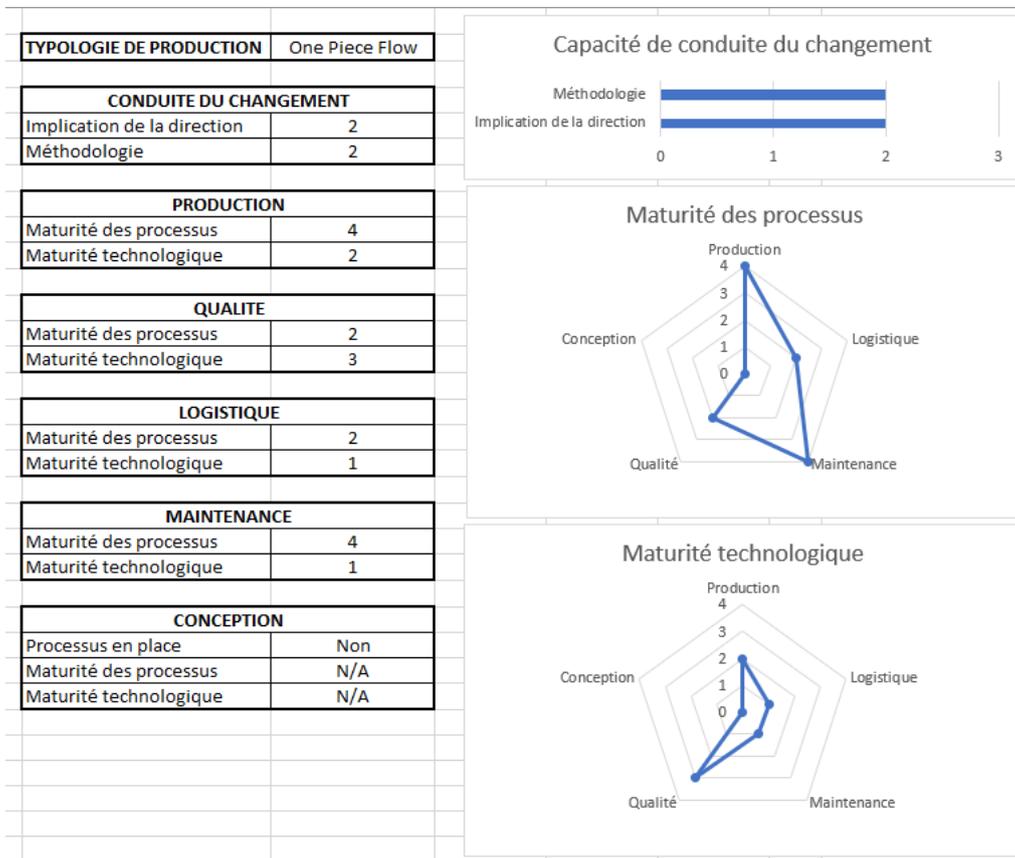


Figure 25. Niveaux de maturité du premier cas d'étude

Suite à la présentation de ces résultats, on présente les préconisations issues de notre outil (Tableau 62).

Classement	Axes prioritaires	Scores d'importance	Dimensions à privilégier
1 <sup>e</sup>	Logistique	3,3	Maturité technologique
2 <sup>e</sup>	Maintenance	3	Maturité technologique
3 <sup>e</sup>	Production	2,4	Maturité technologique
4 <sup>e</sup>	Qualité	0,9	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement

Tableau 62. Axes prioritaires et dimensions à privilégier pour le premier cas d'étude

Par l'application de notre calcul des scores de priorités, c'est l'axe de logistique qui est indiqué comme prioritaire. Puisque son niveau de maturité des processus (niveau 2) est strictement supérieur à son niveau de maturité technologique (niveau 1), notre outil indique que faire des progrès sur la maturité technologique est prioritaire aux progrès à mener sur la maturité des processus dans cet axe. De plus, le niveau le plus bas de capacité à conduire le changement étant de 2, notre outil n'indique pas d'étape préalable de progrès à faire sur cette dimension avant de s'atteler aux solutions technologiques. De la même manière, notre outil propose de se concentrer sur les éléments de maturité technologique pour les deux axes suivants de ce classement, à savoir la maintenance et la production. Enfin, l'axe qualité est dernier de notre classement d'importance à la fois parce que c'est l'axe disposant de la plus grande maturité technologique mais également car il est bas dans le classement d'importance pour la typologie de production de l'entreprise. De plus, la maturité technologique de cet axe étant plus grande que sa maturité des processus, notre outil recommande dans ce cas de travailler sur cette dernière avant d'envisager des progrès technologiques. La capacité de conduite du changement devrait également être traitée avant de faire progresser la maturité technologique de l'axe de qualité.

Les préconisations pour faire progresser la maturité technologique des axes se basent sur les fonctions technologiques les moins développées de ces axes (Tableau 63). Dans ce cas, il s'agit des pratiques de « technologies pour le transport des pièces et produits » pour la logistique, « guidage des opérateurs de maintenance » et « formations des opérateurs de maintenance » pour la maintenance, ainsi que « machines du système de production » et « assistance et collaboration technologique » pour la production.

Suite à la présentation des résultats au responsable de production, ce dernier nous a indiqué être en accord avec l'image de l'entreprise qu'ils dessinent. Il nous a également précisé qu'il approuvait les éléments de préconisations fournis par l'outil, que ce soit dans l'ordre de priorité des axes, ou bien de la manière de faire progresser ses axes en fonction de la dimension à privilégier.

Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	2
	Suivi des opérations de maintenance	2
	Guidage des opérateurs de maintenance	1
	Formations des opérateurs de maintenance	1
Logistique	Guidage des opérateurs logistiques	3
	Technologies pour le transport des pièces/produits	1
	Technologies pour la gestion du magasin	2
	Technologies de suivi des pièces et matériaux	3
	Suivi et traitement des données de logistique	2
	Gestion des commandes fournisseurs	3
	Gestion et prévision des commandes clients	4
Production	Planification de la production	3
	Suivi et traitement des données de production	3
	Guidage des opérateurs de production	3
	Machines du système de production	2
	Assistance et collaboration technologique	2

Tableau 63. Détail des niveaux de maturité des fonctions technologiques des axes prioritaires pour le premier cas d'étude

#### IV. Deuxième cas d'études

Le deuxième cas d'étude est un usineur installé en Lorraine. Cette entreprise a un effectif restreint, entre 10 et 15 personnes. Cette petite taille a mené à la mise en place d'un certain nombre de pratiques informelles. Par exemple, la proximité hiérarchique fait que la communication entre les équipes et la direction se font en direct, sans méthodes ou canaux formellement établis. Sa production est centrée sur la réalisation de produits personnalisés en se basant généralement sur des plans fournis directement par les entreprises clientes. Ses produits consistent en des pièces usinées complexes en métal, ainsi que des petits assemblages de pièces complexes. Après des hésitations, il a été jugé que l'entreprise menait bien quelques pratiques de conception. En effet, bien que le développement des produits ait été réalisé par les clients en amont de leur commande, il est parfois nécessaire de retravailler les plans qu'ils fournissent voire de les réaliser complètement pour certains clients ne pouvant le faire eux-mêmes. Dans ce deuxième cas d'études, nous avons échangé directement avec le dirigeant de l'entreprise.

Lors de l'identification de la typologie de production, l'entreprise a considéré que leur système de production est utilisé pour réaliser une variété importante de produits (réponse « oui » à la question « Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ? »). Elle précise également que presque chacune de ses commandes est unique, puisqu'adaptée spécifiquement aux besoins du client (réponse « non » à la question « Avez-vous une récurrence de la

réalisation de certains produits ? »). Nous avons donc pu identifier la typologie de production de l'entreprise comme étant une production « par projets ».

Les résultats obtenus suite à la phase d'entretien avec l'entreprise sont présentés dans la Figure 26. L'entreprise n'a pas de pratiques réellement en place pour mener la conduite du changement, mesurés au niveau 1. La maturité des différents processus est relativement faible sur les différents axes. L'axe de maintenance est le plus mature (niveau 2), au contraire des quatre autres axes. C'est également le cas de la maturité technologique, reflétant la numérisation peu avancée des technologies de l'entreprise. L'ensemble des axes de la maturité technologique ont été mesurés au niveau 1. Le détail des réponses et des niveaux mesurés dans l'entreprise sont présentés dans l'annexe B.

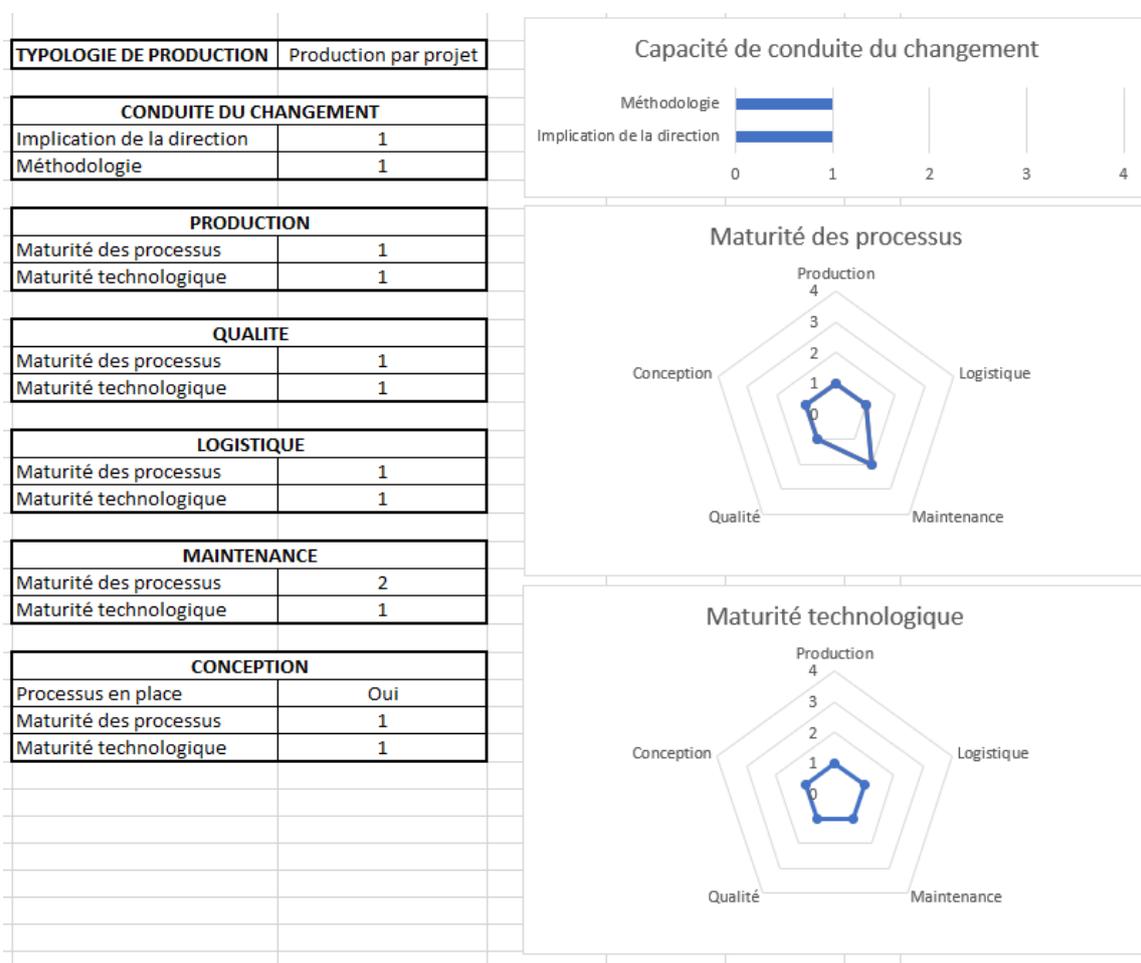


Figure 26. Niveaux de maturité du deuxième cas d'étude

Une fois les résultats obtenus et présentés à l'entreprise, nous nous sommes intéressés aux préconisations proposées par notre outil (Tableau 64). On observe que c'est l'axe de logistique qui a obtenu le score d'importance le plus haut, suivi par l'axe de conception. On trouve ensuite les axes de qualité, de production et enfin l'axe de maintenance. Les scores d'importance sont tous relativement

hauts, en comparaison de ceux obtenus lors du premier cas d'étude. Ils sont également proches les uns des autres, ce qui est logique puisque tous les axes de la maturité technologique ont été mesurés au même niveau. C'est pourquoi l'ordre des priorités obtenu reflète directement l'ordre défini avec l'expert pour cette typologie de production. Pour les quatre premiers axes, l'outil recommande de commencer par mettre en place des actions pour renforcer la maturité des processus de même que la capacité à conduire le changement avant de se concentrer sur l'évolution du dispositif technologique de l'entreprise. En effet, pour tous ces axes, le niveau de maturité des processus est égal à celui de maturité technologique, ce qui explique le résultat fourni par notre premier algorithme. A cause du faible niveau mesuré en capacité de conduite du changement, notre second algorithme indique que des progrès sont nécessaires en pratiques de conduite du changement avant de lancer des projets de transformation technologique, et ce pour tous les axes.

Classement	Axes prioritaires	Scores d'importance	Dimensions à privilégier
1 <sup>e</sup>	Logistique	3,6	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
2 <sup>e</sup>	Conception	3,3	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
3 <sup>e</sup>	Qualité	3	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
4 <sup>e</sup>	Production	2,7	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
5 <sup>e</sup>	Maintenance	2,4	Capacité de conduite du changement

Tableau 64. Axes prioritaires et dimensions à privilégier pour le deuxième cas d'études

Le dirigeant de l'entreprise a considéré que les résultats globaux de maturité mesurés étaient cohérents avec la vision qu'il avait de son entreprise. Par contre, il a rencontré des difficultés à répondre à certains éléments de l'axe « conception » de la maturité technologique. En effet, il a considéré que certaines des fonctions technologiques le constituant n'étaient pas des fonctions pertinentes dans sa situation. Il a jugé qu'il n'était pas utile pour lui que son entreprise dispose de fonctions pour « l'acquisition de données utilisateurs pour la conception », ni de fonctions dédiées à la réalisation de prototypes et de tests sur ces derniers. Or, la présence de ces fonctions dans l'évaluation de la maturité technologique de l'entreprise pourrait potentiellement faire baisser la note de l'entreprise, même dans le cas où celle-ci serait très mature sur les autres fonctions de l'axe. De

plus, ces fonctions ont été indiquées comme devant faire l'objet d'améliorations pour faire évoluer le dispositif technologique sur cet axe, ce qui n'était pas pertinent d'après le dirigeant de l'entreprise.

Un autre élément de désaccord avec ce dernier était la priorité importante donnée à l'axe de conception dans les résultats. En effet, il a jugé ce processus très secondaire pour son entreprise, puisque ces activités ne sont pas systématiques pour chaque projet et ne sont mises en place que lorsqu'elle y est obligée. Il préférerait privilégier d'autres axes, comme la logistique et la qualité, comme l'indiquaient les autres préconisations de notre outil. Les autres éléments recommandés ont été approuvés par le dirigeant, que ce soit l'ordre des axes, ou le fait de se concentrer sur la capacité de conduite du changement ou la formalisation des processus de l'entreprise avant de faire évoluer le dispositif technologique.

## **V. Troisième cas d'études**

Notre troisième cas d'études est une grande entreprise réalisant des colonnes de direction pour différentes marques automobiles. Elle est l'entité française d'un grand groupe international et dispose de plus de 1000 salariés. Comme dans le premier cas d'études, sa présence dans l'écosystème de l'industrie automobile lui impose des contraintes fortes sur la qualité de ses processus et de ses produits. L'entreprise a également développé de manière importante ses dispositifs technologiques, avec la mise en place de technologies comme des AGV pour l'automatisation du processus de logistique ou de robots sur les lignes de production. L'entreprise dispose d'un processus établi pour le développement de nouveaux produits, mais également pour le développement de ses processus de production et de ses lignes de production. L'entretien a été mené auprès du directeur industriel de l'entreprise.

Pour l'identification de la typologie de production, notre interlocuteur a indiqué que le système de production de l'entreprise est centré sur la réalisation d'un ensemble limité de produits différents, puisque les produits sont des variations d'un même type de produit, à savoir les colonnes de direction (réponse « non » à la question « Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ? »). Il a de plus indiqué qu'il est difficile d'introduire de la personnalisation de produits sans perturber le flux de production, même si les temps d'arrêt pour les changements de série sont limités (réponse « oui » à la question « Avez-vous la capacité d'introduire de la personnalisation sans interruption de la production ? »). Suite à ces réponses, la typologie de production de cette entreprise a été identifiée comme étant une production en « grandes séries ».

Les résultats obtenus par l'entreprise à la suite de la phase d'entretiens sont présentés dans la Figure 27. L'entreprise a des pratiques mises en place pour conduire le changement, mesurées au niveau 2. La maturité des processus a été mesurée à un niveau globalement élevé, avec trois axes mesurés au niveau 3 : la production, la qualité et la maintenance. Les deux autres axes (conception et logistique) ont, eux, été mesurés au niveau 2. Pour la maturité technologique, les axes sont moins équilibrés. Il y avait deux axes mesurés au niveau 3 : production et logistique. La maturité technologique des axes de conception, de qualité et de maintenance était mesurée au niveau 1. Le détail des réponses et des niveaux mesurés dans l'entreprise sont présentés dans l'annexe C.

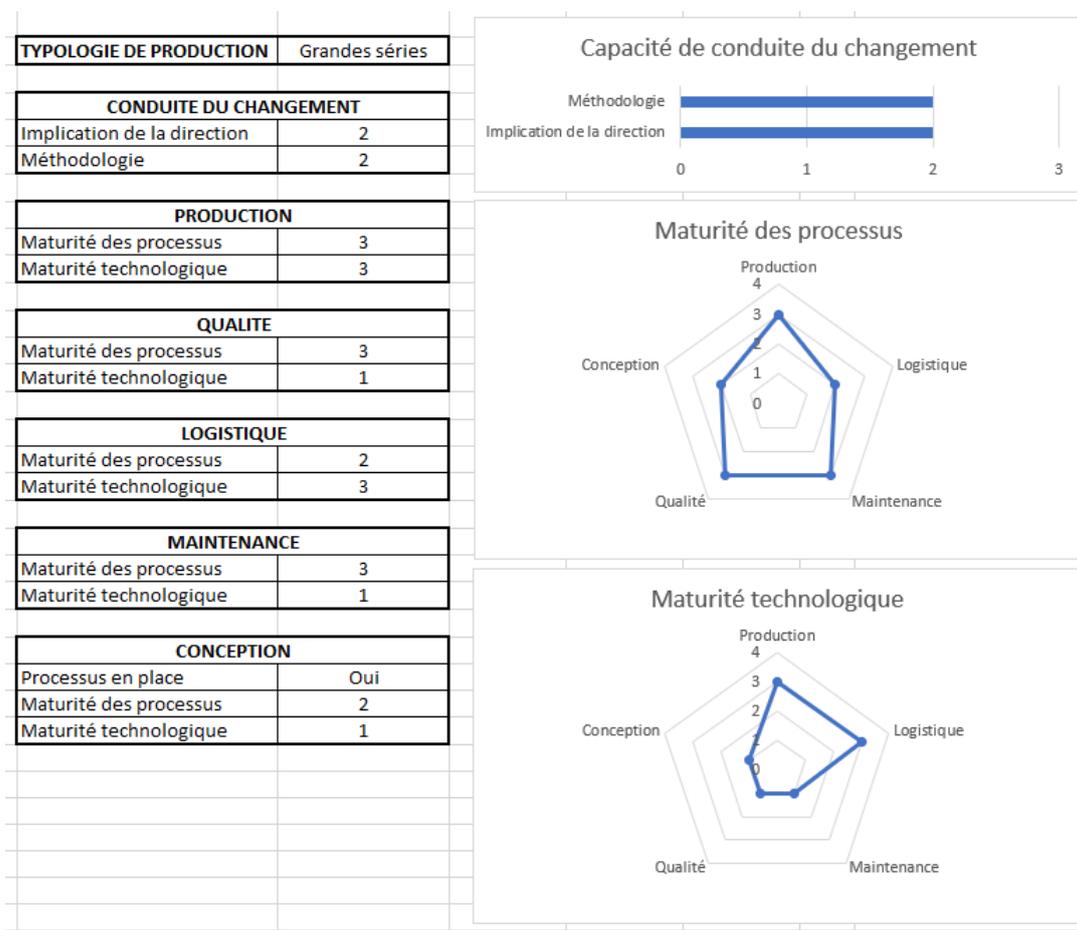


Figure 27. Premiers résultats des niveaux de maturité du troisième cas d'étude

Après avoir présenté les résultats mesurés à notre interlocuteur, nous avons étudié les préconisations proposées par notre outil (Tableau 65). L'axe indiqué comme prioritaire est celui de la qualité, suivi par l'axe de maintenance et l'axe de conception. Leur fort score d'importance est dû à leur niveau 1 en maturité technologique. C'est également ce qui fait que l'algorithme propose de privilégier, pour ces trois axes, le développement des fonctions technologiques. On trouve ensuite dans le classement l'axe de logistique et enfin l'axe de production. Ces deux derniers ont une maturité technologique forte et

à égalité de leur maturité des processus, mesurés au niveau 3. C'est pourquoi nos deux algorithmes suggèrent que, pour ces deux axes, les priorités sont de renforcer les pratiques de conduite du changement ou les processus.

Classement	Axes prioritaires	Scores d'importance	Dimensions à privilégier
1 <sup>e</sup>	Qualité	3,6	Maturité technologique
2 <sup>e</sup>	Maintenance	3,3	Maturité technologique
3 <sup>e</sup>	Conception	2,4	Maturité technologique
4 <sup>e</sup>	Logistique	1	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
5 <sup>e</sup>	Production	0,9	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement

Tableau 65. Premier classement des axes prioritaires et dimensions à privilégier pour le troisième cas d'études

Le directeur de production a déclaré ne pas être d'accord avec les résultats présentés et indiqué, comme c'était le cas lors du deuxième cas d'étude, que certaines fonctions technologiques lors de l'évaluation de la maturité technologique n'étaient pas en place dans son entreprise, et qu'il ne les jugeait pas pertinentes dans son cas. Il s'agissait de la fonction « Procédure de contrôle visuel de la qualité » dans l'axe de qualité et de la fonction « Acquisition de données utilisateurs pour la conception » dans l'axe de conception. Dans les deux cas, ces fonctions avaient été, lors de l'entretien été mesuré au niveau le plus bas et étaient les seules au niveau 1 pour leur axe respectif. Nous avons alors décidé de modifier les réponses pour pouvoir observer les résultats si ces fonctions n'étaient plus prises en compte.

Après cette modification, nous avons pu observer des différences dans les résultats de l'entreprise (Figure 28). Il n'y avait pas de modifications pour la maturité des processus ou la capacité de conduite du changement. Par contre, la situation était différente pour la maturité technologique. Il y avait maintenant, comme pour la maturité des processus, trois axes mesurés au niveau 3 : production, qualité et logistique. La maturité technologique de l'axe conception était maintenant mesurée au niveau 2 et celle de l'axe de maintenance était maintenant la seule mesurée au niveau 1.

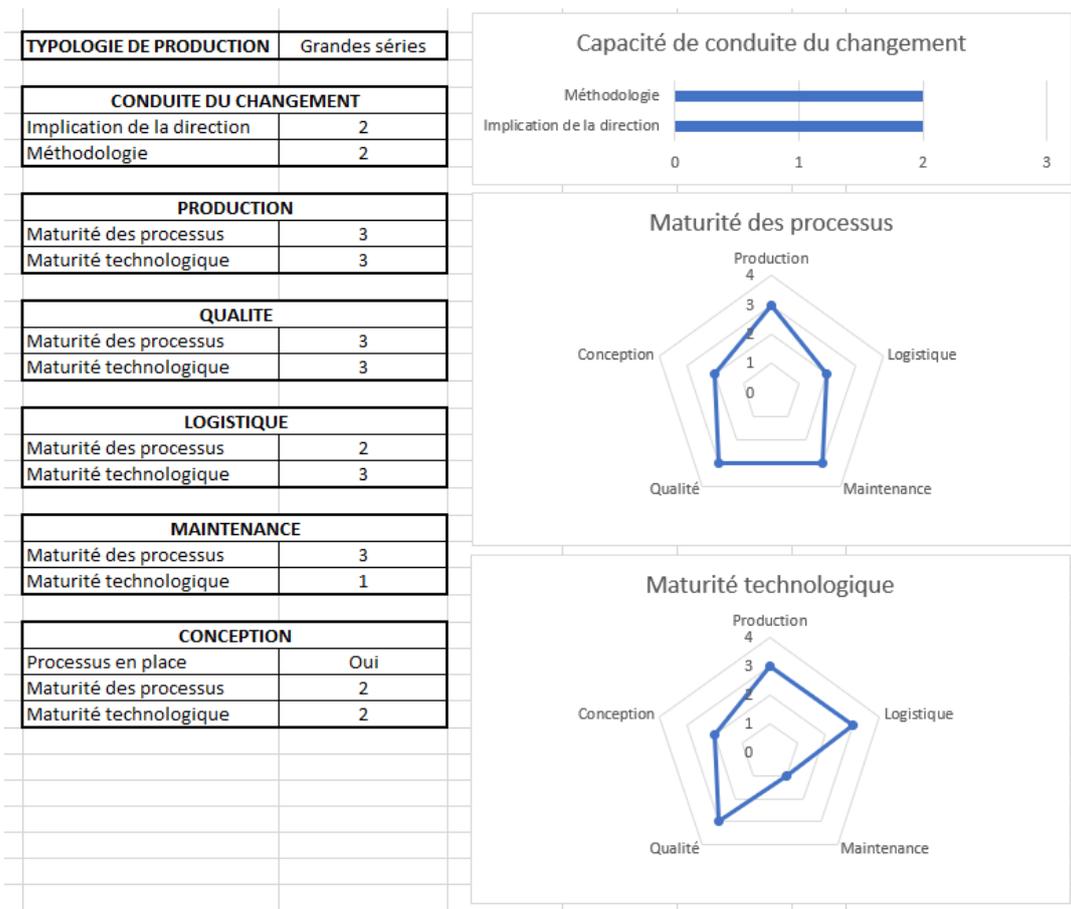


Figure 28. Seconds résultats des niveaux de maturité du troisième cas d'étude

Les préconisations obtenues présentent également des différences importantes (Tableau 66). Ces différences ne concernent pas les deux derniers axes du classement, ceux de logistique et de production. Par contre, l'axe le plus prioritaire, d'après notre outil, n'est plus celui de la qualité, mais plutôt celui de la maintenance, qui est maintenant le seul dont la maturité technologique est au niveau 1. C'est pourquoi le score d'importance de ce dernier est aussi important. Une seule fonction technologique a été mesurée au niveau 1, la « formation des opérateurs de maintenance ». C'est donc elle qui est indiquée comme prioritaire à faire évoluer par notre outil (Tableau 67). L'axe de qualité est maintenant classé au troisième rang de priorité. L'axe de conception, dont la maturité technologique est maintenant mesurée au niveau 2, est maintenant au deuxième rang de priorité. Les dimensions à privilégier pour l'axe de qualité sont maintenant la maturité des processus et la capacité de conduite du changement, là où c'était la maturité technologique avant les modifications. Pour l'axe de conception, la dimension à privilégier est maintenant la maturité des processus.

Classement	Axes prioritaires	Scores d'importance	Dimensions à privilégier
1 <sup>e</sup>	Maintenance	3,3	Maturité technologique
2 <sup>e</sup>	Conception	1,6	Maturité des processus
3 <sup>e</sup>	Qualité	1,2	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
4 <sup>e</sup>	Logistique	1	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement
5 <sup>e</sup>	Production	0,9	Maturité des processus + Capacité de conduite du changement

Tableau 66. Second classement des axes prioritaires et dimensions à privilégier pour le troisième cas d'études

Une fois les modifications faites aux réponses de l'entreprise, le directeur de production nous a déclaré que le profil de l'entreprise présenté par les résultats lui semblait beaucoup plus cohérent avec la vision qu'il en avait. L'ordre de priorité des axes suggéré par notre outil lui semblait également être pertinent. Il a considéré que la manière proposée de faire progresser les axes était adéquate.

Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	3
	Suivi des opérations de maintenance	3
	Guidage des opérateurs de maintenance	2
	Formations des opérateurs de maintenance	1

Tableau 67. Détail des niveaux de maturité des fonctions technologiques des axes prioritaires pour le troisième cas d'étude

## VI. Retours des expérimentations

Le but de ces expérimentations était d'obtenir des retours sur notre modèle et notre outil. A la suite de ces trois cas d'études, on peut tirer plusieurs conclusions :

- Le modèle sur lequel est basé notre outil est pertinent pour analyser la maturité des pratiques dans les entreprises dans l'objectif de les accompagner dans leur évolution technologique ;
- La prise en compte systématique de toutes les fonctions technologiques dans l'évaluation de la maturité technologique peut, dans certains cas, poser problème. En effet, certaines de ces pratiques ne sont pas pertinentes pour toutes les entreprises, ce qui explique que ces dernières ne les mettent pas en place. Or, pour ces entreprises, les résultats de maturité technologique sont alors faussés sur les axes concernés. Cela entraîne un classement de

priorités qui ne correspond pas à l'entreprise, et à une priorisation erronée des actions pour faire évoluer l'axe ;

- La différenciation des différentes entreprises en fonction de leur typologie de production semble adéquate pour adapter les résultats de notre modèle. Néanmoins, nous avons rencontré une difficulté lors de notre deuxième cas d'étude, liée aux pratiques de conception. Tout d'abord, le fait de valider ou non la présence d'un processus de conception ne semble pas aussi simple et binaire qu'imaginé précédemment, et des cas de présence « partielle » du processus semblent exister. De plus, nous avons rencontré une contestation de l'importance relative de ce processus de conception, alors qu'il était jugé plutôt prioritaire pour la typologie de production à laquelle cette entreprise a été rattachée ;
- Le fait que les axes soient classés par ordre d'importance, et que des actions prioritaires soient proposées a été apprécié par les personnes interrogées, qui ont considéré que cela leur donnait plus d'éléments pour faire des choix et construire leur stratégie pour l'évolution de leur dispositif technologique.

A la suite de ces conclusions, des actions ont été envisagées pour continuer le développement de notre outil et améliorer son fonctionnement :

- Cette phase d'expérimentation a été menée auprès de trois entreprises. Il serait nécessaire de réaliser d'autres cas d'études avec des entreprises différentes. En particulier, la typologie de production en « petites séries » n'a pas pu être étudiée, et doit également faire l'objet d'expérimentations. Plus il y aura de cas d'études, et plus notre outil et notre modèle pourront être affinés et corrigés. La méthodologie suivie lors de nos cas d'études peut être appliquée pour ces futures expérimentations ;
- Un autre élément à étudier lors de futurs cas d'études est le classement des priorités en fonction de la typologie de production des entreprises. Un plus grand panel d'entreprises testées serait nécessaire pour confirmer ou corriger ces classements
- Lors de la phase de mesure de la maturité technologique, il serait utile de pouvoir indiquer que certaines fonctions technologiques ne sont pas pertinentes afin qu'elles ne soient pas prises en compte dans le diagnostic de maturité. Il serait intéressant de développer un moyen d'intégrer cet élément de différenciation dans l'outil ;
- Une hypothèse est que cette pertinence des fonctions technologiques dépend peut-être de la typologie de production. Cela pourrait être un des aspects à étudier durant de futurs cas d'études.

## VII. Conclusion

Ce chapitre a présenté la démarche suivie pour la mise en place des expérimentations menées afin de tester l'application de notre modèle 2MTI et de notre outil. Il présente également le profil des entreprises rencontrées et détaille l'ensemble des résultats obtenus et des préconisations proposées. Nous avons enfin décrit les conclusions tirées de cette phase expérimentale.

Ces expérimentations ont été concluantes et ont montré l'intérêt de notre outil pour l'accompagnement de l'évolution technologique des entreprises industrielles. Les retours sur les éléments composant notre outil ont été positifs. Néanmoins, ces cas d'études ont également soulevé des limites.

A la suite de ce travail de recherche, l'UIMM Lorraine a pour objectif d'exploiter l'outil qui en est issu pour proposer à ses entreprises adhérentes un service d'accompagnement à leur développement technologique. Elles auront ainsi les moyens de construire des stratégies adaptées pour leur évolution technologique. Cela représente également de nouvelles opportunités pour collecter des données sur un plus grand panel d'entreprises.

---

## Conclusion

---

<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>146</b>
<b>II.</b>	<b>SYNTHESE DES CONTRIBUTIONS.....</b>	<b>146</b>
A.	MODELE DE MATURETE 2MTI.....	146
B.	REGLES D'ACCOMPAGNEMENT A L'EVOLUTION TECHNOLOGIQUE.....	147
C.	SYSTEME DE PRECONISATIONS POUR LA DETERMINATION DE PRIORITES.....	147
<b>III.</b>	<b>LIMITE DES TRAVAUX ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>147</b>

---

## I. Introduction

Dans le contexte de l'Industrie 4.0 et de la transformation technologique des entreprises industrielles, ces dernières font face à des difficultés importantes dans les choix à faire et les démarches à suivre pour l'intégration de nouvelles technologies. Ce travail de thèse cherche à répondre à deux verrous :

- 1) Comment mesurer la capacité d'une entreprise à acquérir et intégrer correctement de nouveaux éléments technologiques ?
- 2) Comment évaluer l'impact des changements de maturité technologique de l'entreprise sur l'atteinte de ses objectifs ?

La partie suivante détaille les contributions développées pour répondre à ces problématiques.

## II. Synthèse des contributions

Notre travail de thèse s'inscrit dans un contexte d'évolutions des technologies de production, et de contraintes sur le développement technologique des entreprises industrielles. L'objectif principal était d'offrir un soutien à ces dernières, afin de les accompagner et les conseiller dans leurs évolutions. Nous avons choisi de développer un système pour évaluer une maturité pour l'intégration de nouvelles technologies pour répondre à ce besoin. Notre première contribution est un modèle de maturité en trois dimensions (capacité de conduite du changement, maturité des processus, maturité technologique), chacune associée à des axes et des pratiques. Nous avons alors construit des grilles de maturité pour chacune des pratiques. Ensuite, nous avons construit des règles de prérequis pour assurer la bonne intégration des technologies et des prédictions des bénéfices obtenus pour ces technologies, afin d'aider à guider les choix de technologies des entreprises. Enfin, nous avons construit un système de préconisations en se basant sur nos règles pour exploiter les résultats issus du modèle de maturité et indiquer des priorités aux entreprises accompagnées.

### a. Modèle de maturité 2MTI

Notre première contribution est le modèle de maturité 2MTI, qui répond à notre premier verrou. Après avoir identifié les dimensions à prendre en compte (capacité de conduite du changement, maturité des processus, maturité technologique), nous avons étudié les modèles de maturité existants. Après avoir conclu que ces derniers ne prennent pas en compte de manière satisfaisante les trois modèles, la décision a été prise d'établir notre propre modèle. Chacune des dimensions est associée à des axes :

---

cinq pour les dimensions de maturité des processus et de maturité technologique, et deux pour la capacité de conduite du changement. Ces axes sont ensuite déclinés sur des pratiques, qui ont été dotées de grilles de maturité pour pouvoir évaluer le niveau des entreprises.

### **b. Règles d'accompagnement à l'évolution technologique**

Notre deuxième contribution est une méthodologie pour le développement de règles d'accompagnement à l'évolution technologique. Ces règles sont de deux types : des règles de prérequis pour assurer la bonne intégration de différentes technologies, et des prédictions sur les bénéfices obtenus grâce à ces dernières, permettant d'aider aux choix des entreprises. Cette méthodologie a été appliquée à la technologie ERP, ce qui a été décrit dans le chapitre 3. Néanmoins, il serait nécessaire de d'appliquer cette méthodologie à d'autres technologies industrielles afin d'offrir un ensemble plus complet de règles.

### **c. Système de préconisations pour la détermination de priorités**

Notre troisième contribution est notre système pour établir des préconisations à partir des résultats du modèle de maturité 2MTI. Avec un calcul de scores d'importance et des algorithmes pour établir les priorités de dimensions à traiter pour chaque axe, les entreprises accompagnées se voient fournir des informations utiles pour qu'elles puissent bâtir leur stratégie d'évolution technologique. Afin de pouvoir appliquer ce système, nous avons construit un prototype fonctionnel d'outil reprenant le modèle 2MTI et le système de préconisations sur Excel. Cet outil a été utilisé pour mener des expérimentations.

## **III. Limite des travaux et perspectives**

Nos travaux ont proposé un modèle de maturité et un outil pour accompagner les entreprises industrielles dans leur évolution technologique vers l'Industrie 4.0. Néanmoins, nous avons rencontré des limites et nous n'avons pas pu approfondir l'ensemble des thèmes abordés. Nous espérons, à travers ces travaux, avoir proposé des contributions pouvant être utilisées pour explorer plus avant ces thématiques.

---

Pour commencer, il serait intéressant de multiplier les cas d'étude pour notre modèle et notre outil. Nous avons eu l'opportunité de travailler avec trois entreprises industrielles, avec des typologies de production différentes. Néanmoins, il s'agit d'un panel limité. De plus, une des quatre typologies n'a pas fait l'objet d'un cas d'études. C'est pourquoi il y a une opportunité de compléter ce travail par la mise en place de nouvelles expérimentations. Cela permettrait de collecter des données pour valider ou corriger notre modèle, ou le classement de priorités des axes en fonction de la typologie de production. De plus, cela pourrait permettre de constituer une base de données. Avec une base de données suffisamment riche, il serait possible de construire un système de recommandations utilisant les cas déjà traités pour optimiser les réponses fournies aux entreprises accompagnées.

Avec notre deuxième contribution, nous avons développé une base de méthodologie pour établir des règles de prérequis et de prévision des améliorations potentielles des technologies. Cette méthodologie a été appliquée sur la technologie ERP. Nous pensons néanmoins qu'il y a, pour aller plus loin, un travail à réaliser d'application de cette méthodologie pour établir d'autres règles génériques pour un panel plus complet de technologies. Avec un lot plus complet de technologies traitées, cet ensemble de règles pourraient être appliquées pour faire mieux correspondre les recommandations aux objectifs d'amélioration de performance des entreprises.

Durant la construction de notre système de préconisations, nous avons étudié les différents systèmes de production des entreprises industrielles. Après une étude de la littérature, nous avons sélectionné quatre typologies de production correspondant à notre contexte : la production par projets, la production en petites séries, la production en grandes séries et la production en One-Piece Flow. Pourtant, d'autres typologies avaient été proposées par les sources étudiées. Par exemple, nous avons laissé de côté la production en continu (Nemetz & Fry, 1988), aussi nommée production par processus (Kalagnanam & Lindsay, 1999). A cause de cela, certaines entreprises industrielles ont été laissées hors du cadre de notre étude. Il pourrait être intéressant, dans la perspective d'élargir la capacité à accompagner les entreprises industrielles, de d'identifier les spécificités de ces modes de production non étudiés afin de compléter notre système de préconisations.

Les technologies de l'Industrie 4.0 sont technologies « connectées », c'est-à-dire qu'elles sont reliées à des réseaux s'étendant au sein et à l'extérieur de l'entreprise. Cela implique deux points :

- Tout d'abord, pour que ces technologies puissent être utilisées à leur plein potentiel, l'entreprise doit être dotée d'un système d'information maîtrisé. Il serait donc pertinent de vérifier le niveau de l'entreprise sur le sujet pour s'assurer de sa capacité à exploiter correctement les technologies ;

- 
- Ces technologies étant connectées à des réseaux hors des frontières de l'entreprise, elles peuvent présenter failles de cybersécurité pouvant impliquer des impacts critiques sur le *business model* et une perte de compétitivité (Mullet et al., 2021). Des brèches de sécurité pourraient entraîner 3 types de risques identifiés : des pertes de disponibilité (équipements, données), des pertes d'intégrité et des pertes de confidentialité. Il serait donc pertinent de vérifier le niveau de l'entreprise sur le sujet pour éviter de créer de nouveaux risques (Drath & Horch, 2014).

Pour ces deux points, la validation de ces niveaux pourrait être exploités comme des prérequis, à l'instar de la capacité de conduite du changement. Ainsi, le système pourrait préconiser, si le niveau est insuffisant, des progrès à faire en amont de l'acquisition de technologies correspondant à des niveaux de maturité technologique 3 ou 4.

Enfin, une nouvelle notion est apparue récemment : l'Industrie 5.0. Le terme est formellement apparu en 2021, avec la publication par la Commission Européenne d'un document intitulé « Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry » (Xu et al., 2021). Cette nouvelle notion, insistant sur les valeurs de durabilité, de résilience et de centrage sur l'humain, propose un changement de paradigme pour le développement du monde industriel. Les technologies clés sur lesquelles elle se base sont en parties les mêmes que l'Industrie 4.0, comme l'intelligence artificielle ou les ensembles de capteurs, mais elles intègrent également d'autres éléments technologiques comme le stockage de l'énergie ou les technologies bio-inspirées. Le développement de l'Industrie 5.0 pourrait changer le contexte industriel et les priorités et besoins des entreprises. Il pourrait donc être intéressant d'étudier plus en profondeur ce nouveau paradigme pour pouvoir adapter notre modèle et notre outil à ces changements. Par exemple, il serait peut-être nécessaire de développer de nouvelles dimensions ou de nouveaux axes, ou bien d'intégrer de nouveaux niveaux de maturité aux échelles déjà existantes.

---

## Références

- Aheleroff, S., Philip, R., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2019). The degree of mass personalisation under industry 4.0. *Procedia CIRP*, *81*, 1394–1399. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.050>
- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality and Reliability Management*, *25*(7), 709–756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890>
- Al-Mashari, M., & Al-Mudimigh, A. (2003). ERP implementation: Lessons from a case study. *Information Technology & People*, *16*(1), 21–33. <https://doi.org/10.1108/09593840310463005>
- American Productivity & Quality Center. (2018). *Cross Industry Process Classification Framework (V 7.2.1)*. [https://www.apqc.org/system/files/resource-file/2020-06/Cross%20Industry%20v7.2.1\\_Final.pdf](https://www.apqc.org/system/files/resource-file/2020-06/Cross%20Industry%20v7.2.1_Final.pdf)
- Anderl, R., & Fleischer, J. (2015). Guideline Industrie 4.0 - Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses. *VDMA Verlag*, 32. [industrie40.vdma.org](http://industrie40.vdma.org)
- Ang, J. H., Goh, C., & Li, Y. (2016, July). Smart Design for Ships in a Smart Product Through-Life and Industry 4.0 Environment. *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*.
- Ang, J. H., Goh, C., Saldivar, A. A. F., & Li, Y. (2017). Energy-efficient through-life smart design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment. *Energies*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/en10050610>
- Ansari, F., Glawar, R., & Nemeth, T. (2019). PriMa: a prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *32*(4–5), 482–503. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571236>
- Avallé, G., De Pace, F., Fornaro, C., Manuri, F., & Sanna, A. (2019). An Augmented Reality System to Support Fault Visualization in Industrial Robotic Tasks. *IEEE Access*, *7*, 132343–132359. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940887>
- Avella, L., Fernandez, E., & Vazquez, C. J. (2001). Analysis of manufacturing strategy as an explanatory factor of competitiveness in the large Spanish industrial firm. *International Journal of Production Economics*, *72*(2), 139–157.
- Ayers, J. B. (2010). *Supply chain project management : a structured collaborative and measurable approach*. CRC Press.
- Backlund, F., Chronéer, D., & Sundqvist, E. (2014). Project Management Maturity Models – A Critical Review: A case study within Swedish engineering and construction organizations. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *119*, 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.03.094>
- Banker, R. D., Bardhan, I., & Asdemir, O. (2006). Understanding the Impact of Collaboration Software on Product Design and Development. *Information Systems Research*, *17*(4), 352–373. <https://doi.org/10.1287/isre.1060.0104>
- Barker, T., & Frolick, M. N. (2003). ERP implementation failure: a case study. *Information Systems Management*, *20*(4), 43–49. <https://doi.org/10.1201/1078/43647.20.4.20030901/77292.7>

- 
- Becker, J., Knackstedt, R., & Pöppelbuß, J. (2009). Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, 1(3), 213–222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Ben Zaïda, Y. (2008). *Contribution à la Conduite du Changement pour l'Evolution du Système Entreprise* [Université Montpellier II]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00364895>
- Bessant, J., & Francis, D. (1997). Implementing the new product development process. *Technovation*, 17(4), 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0166-4972\(97\)84690-1](https://doi.org/10.1016/S0166-4972(97)84690-1)
- Blanco-Novoa, O., Fernandez-Carames, T. M., Fraga-Lamas, P., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A Practical Evaluation of Commercial Industrial Augmented Reality Systems in an Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, 6, 8201–8218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802699>
- Boly, V., Morel, L., Assielou, N. G., & Camargo, M. (2014). Evaluating innovative processes in french firms: Methodological proposition for firm innovation capacity evaluation. *Research Policy*, 43(3), 608–622. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.09.005>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Sacconi, N. (2018). The role of digital technologies to overcome Circular Economy challenges in PSS Business Models: An exploratory case study. *Procedia CIRP*, 73, 216–221. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.322>
- Caggiano, A. (2018). Cloud-based manufacturing process monitoring for smart diagnosis services. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(7), 612–623. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1425552>
- Canizo, M., Conde, A., Charramendieta, S., Minon, R., Cid-Fuentes, R. G., & Onieva, E. (2019). Implementation of a large-scale platform for cyber-physical system real-time monitoring. *IEEE Access*, 7, 52455–52466. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911979>
- Carvajal Soto, J. A., Tavakolizadeh, F., & Gyulai, D. (2019). An online machine learning framework for early detection of product failures in an Industry 4.0 context. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4–5), 452–465. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571238>
- Castagnoli, R. (2021). *Le rôle de la performance, des obstacles, des incitations et de la complexité dans l'Industrie 4.0*. Université Paris-Saclay.
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2017). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Chen, T., & Lin, Y. C. (2017). Feasibility Evaluation and Optimization of a Smart Manufacturing System Based on 3D Printing: A Review. *International Journal of Intelligent Systems*, 32(4), 394–413. <https://doi.org/10.1002/int.21866>
- Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, 3(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009>
- Chong, L., Ramakrishna, S., & Singh, S. (2018). A review of digital manufacturing-based hybrid additive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5–8), 2281–2300. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1345-3>
- Clarke, A., & Garside, J. (1997). The Development of a Best Practice Model For Change Management. *European Management Journal*, 15(5), 537–545.
-

- 
- Clarke, A., & Manton, S. (1997). A benchmarking tool for change management. *Business Process Management Journal*, 3(3), 248–255. <https://doi.org/10.1108/14637159710192293>
- Cohen, Y., Naseraldin, H., Chaudhuri, A., & Pilati, F. (2019). Assembly Systems in Industry 4.0 Era: A Road-Map to Understand Assembly 4.0. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 4037–4054.
- Coleman, D. C. (1956). Industrial Growth and Industrial Revolutions. *Economica*, 23(89), 1–22. <http://www.jstor.org/URL:http://www.jstor.org/stable/2551266> Accessed:28-09-2015 13:39 UTC
- Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, C., & Wæhrens, B. V. (2019). A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control*, 48, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.001>
- Cooke, F. L. (2000). Implementing TPM in plant maintenance: Some organisational barriers. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(9), 1003–1016. <https://doi.org/10.1108/02656710010378789>
- Courtois, A., Martin, C., & Pillet, M. (1989). *Gestion de production*. Editions d'Organisation.
- Crestani, D. (2005, June). ADESI : Une Action Spécifique pour la Conduite du Changement des Systèmes Industriels. *6e Congrès International de Génie Industriel*.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Dangayach, G. S., & Deshmukh, S. G. (2001). Manufacturing strategy - Literature review and some issues. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(7), 144–3577. <http://www.emerald-library.com/ft>
- Dangayach, G. S., & Deshmukh, S. G. (2006). An exploratory study of manufacturing strategy practices of machinery manufacturing companies in India. *Omega*, 34(3), 254–273. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.10.009>
- Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017, May). Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie. *12ème Congrès International de Génie Industriel*.
- Davenport, T., Harris, J., & Cantrell, S. (2002). *The return of enterprise solutions*.
- Dean, P. R., Tu, Y. L., & Xue, D. (2009). An information system for one-of-a-kind production. *International Journal of Production Research*, 47(4), 1071–1087. <https://doi.org/10.1080/00207540701543593>
- Dethine, B. (2023). *Vers une méthode d'aide à la décision pour définir la stratégie numérique des PME industrielles*. Université de Lorraine.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8(2), 56–58. <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2312079>
- Durão, L. F. C. S., Christ, A., Zancul, E., Anderl, R., & Schützer, K. (2017). Additive manufacturing scenarios for distributed production of spare parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 869–880. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0555-z>
-

- 
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2>
- Ehie, I. C., & Madsen, M. (2005). Identifying critical issues in enterprise resource planning (ERP) implementation. *Computers in Industry*, 56(6), 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.02.006>
- El Zant, C. (2021). *Industrie 4.0 processus - Quel modèle pour une intégration réussie* [HESAM Université]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03677479>
- Enjolras, M. (2016). *Méthodologie d'analyse de la capacité à innover et à exporter des PME manufacturières et de procédés : identification et caractérisation d'un espace commun en vue de l'élaboration d'un outil multicritères d'aide à la décision*. Université de Lorraine.
- Equipe de Recherche sur les Processus Innovatifs. (2022). *A propos de l'ERPI*. <https://erpi.univ-lorraine.fr/fr/about/>
- Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2018). A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. *Production Planning and Control*, 29(8), 633–644. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960>
- Ferraguti, F., Pini, F., Gale, T., Messmer, F., Storchi, C., Leali, F., & Fantuzzi, C. (2019). Augmented reality based approach for on-line quality assessment of polished surfaces. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.007>
- Fraboulet, D. (2012). L'Union des industries métallurgiques et minières Organisation, stratégies et pratiques du patronat métallurgique (1901-1940). *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, 114(2), 117–135. [www.cairn.info](http://www.cairn.info)
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's towards industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119–1128. <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>
- Garay-Rondero, C. L., Martinez-Flores, J. L., Smith, N. R., Caballero Morales, S. O., & Aldrette-Malacara, A. (2020). Digital supply chain model in Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 887–933. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0280>
- Geissbauer, R., Vedso, J., & Schrauf, S. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*.
- Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050>
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910–936. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>
- Gimélec. (2014). *Industrie 4.0 - Les leviers de la transformation*. 3, 28–38.
- Grabowska, M., & Takala, J. (2018). Assessment of quality management system maturity. In *Advances in Manufacturing* (Issue 201519, pp. 889–898). Springer Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6\\_86](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_86)
-

- 
- Haider, A. A., Jahanzaib, M., & Akhtar, K. (2007). Experimental comparison of one piece flow production: A simulation based approach. *European Journal of Scientific Research*, 19(1), 97–104.
- Hawking, P., Stein, A., & Foster, S. (2004). Revisiting ERP Systems: Benefit Realisation. *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- Hayes, J. (2002). *The Theory and Practice of Change Management*. Palgrave HE UK.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- Hofmann, E., & Rüscher, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Hornstein, H. A. (2015). The integration of project management and organizational change management is now a necessity. *International Journal of Project Management*, 33(2), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.08.005>
- Huber, W. (2016). *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion - Ein Praxisbuch* (Springer Vieweg, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12732-9>
- Illa, P. K., & Padhi, N. (2018). Practical Guide to Smart Factory Transition Using IoT, Big Data and Edge Analytics. *IEEE Access*, 6, 55162–55170. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872799>
- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 16290:2013 - Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment*.
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 57(3), 829–846. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>
- Jones, R., Jimmieson, N., & Griffiths, A. (2005). The Impact of Organizational Culture and Reshaping Capabilities on Change Implementation Success: The Mediating Role of Readiness for Change. *Journal of Management Studies*, 42(2), 361–386.
- Jung, K., Kulvatunyou, B., Choi, S., & Brundage, M. (2016). An Overview of a Smart Manufacturing System Readiness Assessment. *IFIP Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World*, 1, 705–712. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7\\_83](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_83)
- Kagermann, H. (2015). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In H. Albach, H. Meffert, A. Pinkwart, & R. Reichwald (Eds.), *Management of Permanent Change* (pp. 23–45). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2)
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*.
- Kalaganam, S. S., & Lindsay, R. M. (1999). The use of organic models of control in JIT firms: generalising Woodward's findings to modern manufacturing practices. *Accounting, Organizations and Society*, 24(1), 1–30. [https://doi.org/10.1016/S0361-3682\(97\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0361-3682(97)00062-7)
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process*

- 
- Safety and Environmental Protection*, 117, 408–425.  
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kannan, S. M., Suri, K., Cadavid, J., Barosan, I., Brand, M. Van Den, Alferez, M., & Gerard, S. (2017). Towards industry 4.0: Gap analysis between current automotive MES and industry standards using model-based requirement engineering. *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Software Architecture Workshops, ICSAW 2017: Side Track Proceedings, 0*, 29–35.  
<https://doi.org/10.1109/ICSAW.2017.53>
- Karimi, J., Somers, T. M., & Bhattacharjee, A. (2007). The Impact of ERP Implementation on Business Process Outcomes: A Factor-Based Study. *Journal of Management Information Systems*, 24(1), 101–134. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240103>
- Kaushish, J. P. (2010). *Manufacturing processes* (PHI Learning Pvt. Ltd., Ed.).
- Kim, D. H., Kim, T. J. Y., Wang, X., Kim, M., Quan, Y. J., Oh, J. W., Min, S. H., Kim, H., Bhandari, B., Yang, I., & Ahn, S. H. (2018). Smart Machining Process Using Machine Learning: A Review and Perspective on Machining Industry. In *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology* (Vol. 5, Issue 4, pp. 555–568). Korean Society for Precision Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0057-y>
- Koether, R., & Meier, K.-J. (2017). *Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung* (Springer Gabler, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13969-8>
- Kollros, C. (2021). *Comment donner aux PME les moyens de réussir un passage structuré à l'Industrie 4.0 ?* Université Grenoble Alpes.
- Kosieradzka, A. (2017). Maturity Model for Production Management. *Procedia Engineering*, 182, 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.109>
- Kotter, J. P. (2012). *Leading change*. Harvard Business Review Press.
- Kucukoglu, I., Atici-Ulusu, H., Gunduz, T., & Tokcalar, O. (2018). Application of the artificial neural network method to detect defective assembling processes by using a wearable technology. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.001>
- Kumar, R., Singh, S. P., & Lamba, K. (2018). Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 204, 643–659.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.327>
- Lahti, M., Shamsuzzoha, A. H. M., & Helo, P. (2009). Developing a maturity model for Supply Chain Management. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5(6), 654–678.  
<https://doi.org/10.1504/IJLSM.2009.024796>
- Lee, C. K. M., Lv, Y., Ng, K. K. H., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2753–2768. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592>
- Lee, J., Jun, S., Chang, T. W., & Park, J. (2017). A smartness assessment framework for smart factories using analytic network process. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5), 1–15.  
<https://doi.org/10.3390/su9050794>
- Lewin, K. (1951). *Field Theory in Social Science* (D. Cartwright, Ed.).
-

- 
- Li, Z., Wang, Y., & Wang, · Ke-Sheng. (2017). Intelligent Predictive Maintenance for Fault Diagnosis and Prognosis in Machine Centers-Industry 4.0 Scenario. *Advances in Manufacturing*, 5, 377–387.
- Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., & Millack A. (2018). *IMPULS industrie 4.0 readiness*.
- Lindberg, C.-F., Tan, S. T., Yan, J. Y., & Starfelt, F. (2015). Key Performance Indicators Improve Industrial Performance. *Energy Procedia*, 75, 1785–1790.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.474>
- Lizarralde Dorronsoro, R., Ganzarain Epelde, J., López, C., & Serrano Lasa, I. (2020). An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies. *Technological Forecasting and Social Change*, 159(July), 120203. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120203>
- Lolli, F., Balugani, E., Ishizaka, A., Gamberini, R., Rimini, B., & Regattieri, A. (2019). Machine learning for multi-criteria inventory classification applied to intermittent demand. *Production Planning and Control*, 30(1), 76–89. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1525506>
- Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2019). Ubiquitous knowledge empowers the Smart Factory: The impacts of a Service-oriented Digital Twin on enterprises' performance. *Annual Reviews in Control*, 47, 221–236. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.01.001>
- Madu, C. N. (1999). Reliability and quality interface. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 16(7), 691–698. <https://doi.org/10.1108/02656719910286198>
- Madu, C. N. (2000). Competing through maintenance strategies. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(9), 937–948.  
[http://www.mcbup.com/research\\_registers/quality.asp](http://www.mcbup.com/research_registers/quality.asp)
- Maguire, S., Ojiako, U., & Said, A. (2010). ERP implementation in Omantel: a case study. *Industrial Management and Data Systems*, 110(1), 78–92. <https://doi.org/10.1108/02635571011008416>
- Maier, H. T., Schmiedbauer, O., & Biedermann, H. (2020). Validation of a Lean Smart Maintenance Maturity Model. *Technical Journal*, 14(3), 296–302. <https://doi.org/10.31803/tg-20200706131623>
- Marek, S., Schuh, G., & Stich, V. (2020). Identification of multidimensional key performance indicators for manufacturing companies. *2020 IEEE Technology & Engineering Management Conference (TEMSCON)*.
- Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>
- Mayr, A., Weigelt, M., Kühl, A., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., & Franke, J. (2018). Lean 4.0-A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 72, 622–628. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.292>
- Miltenburg, J. (2001). One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: a tutorial. *IIE Transactions*, 33, 303–321.
- Miranda, J., Pérez-Rodríguez, R., Borja, V., Wright, P. K., & Molina, A. (2019). Sensing, smart and sustainable product development (S3 product) reference framework. *International Journal of Production Research*, 57(14), 4391–4412. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401237>
-

- 
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49(June), 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Morlock, F., Wienbruch, T., Leineweber, S., Kreimeier, D., & Kuhlenkötter, B. (2016). Industrie 4.0-Transformation für produzierende Unternehmen. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(5), 306–309. <https://doi.org/10.3139/104.111514>
- Motawa, I. A., Anumba, C. J., Lee, S., & Peña-Mora, F. (2007). An integrated system for change management in construction. *Automation in Construction*, 16(3), 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.07.005>
- Moya Sedan, C. A. (2021). *Développement de la capacité à open innover des fournisseurs*. Université de Lorraine.
- Mullet, V., Sondi, P., & Ramat, E. (2021). A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0. *IEEE Access*, 9, 23235–23263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056650>
- Muñoz, A., Mahiques, X., Solanes, J. E., Martí, A., Gracia, L., & Tornero, J. (2019). Mixed reality-based user interface for quality control inspection of car body surfaces. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 75–92.
- Nagy, J., Oláh, J., Erdei, E., Máté, D., & Popp, J. (2018). The role and impact of industry 4.0 and the internet of things on the business strategy of the value chain-the case of hungary. *Sustainability*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103491>
- Nemetz, P. L., & Fry, L. W. (1988). Flexible Manufacturing Organizations: Implications for Strategy Formulation and Organization Design. *Academy of Management Review*, 13(4), 627–638.
- Ngai, E. W. T., Chau, D. C. K., Poon, J. K. L., & To, C. K. M. (2013). Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.12.018>
- Obiso, J.-J. A., Himang, C. M., Ocampo, L. A., Bongo, M. F., Caballes, S. A. A., Abellana, D. P. M., Deocarís, C. C., Padua, R., & Ancheta Jr., R. (2019). Management of Industry 4.0-reviewing intrinsic and extrinsic adoption drivers and barriers. *International Journal of Technology Management*, 81, 210–257.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. <https://doi.org/10.4324/9780203967461>
- Paulk, M. C., Curtis, B., Chrissis, M. B., & Weber, C. V. (1993). Capability Maturity Model, Version 1.1. *IEEE Software*, 10(4), 18–27. <https://doi.org/10.1109/52.219617>
- Peres, R. S., Barata, J., Leitao, P., & Garcia, G. (2019). Multistage Quality Control Using Machine Learning in the Automotive Industry. *IEEE Access*, 7, 79908–79916. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923405>
- Poirier, C. C. (1999). *Advanced Supply Chain Management: How to Build a Sustained Competitive Advantage* (Berrett-Koehler Publishers Inc., Ed.).
-

- 
- Poirier, C. C., & Bauer, M. J. (2001). *E-Supply chain : Using the Internet to Revolutionize Your Business* (Berrett-Koehler Publishers Inc., Ed.).
- Pollák, M., & Tkáč, J. (2019). Enterprise information data management system for small manufacturing company. *TEM Journal*, 8(4), 1169–1175. <https://doi.org/10.18421/TEM84-09>
- Poór, P., Trstenjak, M., Basl, J., & Opetuk, T. (2020). Maintenance Ideal Model in Industry 4.0 – A Transformation Strategy Roadmap to Readiness Factor Calculation. *Proceedings of the International Scientific Conference Hradec Economic Days 2020*, 10, 642–648. <https://doi.org/10.36689/uhk/hed/2020-01-073>
- Porter, M. E. (1985). *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance* (The free press).
- PRTM Management Consultants. (2005). *Supply Chain Management Maturity Model : Understand the Transformation Required to Move from a Functionally Focused Supply Chain to Cross-enterprise Collaboration*.
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qin J., Liu Y., & Grosvenor R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 00. [www.sciencedirect.com/locate/procedia2212-8271](http://www.sciencedirect.com/locate/procedia2212-8271)
- Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G Technologies on Industry 4.0. *Wireless Personal Communications*, 100(1), 145–159. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7>
- Rockwell Automation. (2014). The Connected Enterprise Maturity Model. In *Industria Conectada 4.0*. <http://www.rockwellautomation.com/rockwellautomation/innovation/connected-enterprise/maturity-model.page?>
- Rojas, R. A., & Rauch, E. (2019). From a literature review to a conceptual framework of enablers for smart manufacturing control. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 517–533. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03854-4>
- Rosenthal, C. W. (1991). A Structured Method for Assessing the Maturity of an Electronic Design Process. *Technology Management : The New International Language*, 242–246. <https://doi.org/10.1109/PICMET.1991.183624>
- Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: Smart Scheduling. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3802–3813. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248>
- Rother, E. (2020). *Prise en compte des spécificités culturelles et des mutations nécessaires dans le management industriel français pour répondre aux nouvelles exigences de l'industrie 4.0* [INSA Lyon]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03102742>
- Roy, R., Stark, R., Tracht, K., Takata, S., & Mori, M. (2016). Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 667–688. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.006>
- Rüßmann, 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*.
-

- 
- Sadrzadehrafiei, S., Chofreh, A. G., Hosseini, N. K., & Sulaiman, R. (2013). The Benefits of Enterprise Resource Planning (ERP) System Implementation in Dry Food Packaging Industry. *Procedia Technology*, 11, 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.184>
- Santos, K., Loures, E., Piechnicki, F., & Canciglieri, O. (2017). Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1358–1365. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.265>
- Savastano, M., Amendola, C., Bellini, F., & D'Ascenzo, F. (2019). Contextual impacts on industrial processes brought by the digital transformation of manufacturing: A systematic review. *Sustainability*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/su11030891>
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Toro, C., & Szczerbicki, E. (2015). Virtual engineering object (VEO): Toward experience-based design and manufacturing for industry 4.0. *Cybernetics and Systems*, 46(1–2), 35–50. <https://doi.org/10.1080/01969722.2015.1007734>
- Shang, S., & Seddon, P. B. (2000). A Comprehensive Framework for Classifying the Benefits of ERP Systems. *AMCIS 2000 Proceedings*, 1005–1014. <http://aisel.aisnet.org/amcis2000/39>
- Sharma, A. K., Shudhanshu, & Bhardwaj, A. (2012). Manufacturing performance and evolution of TPM. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(3), 854–866. <https://www.researchgate.net/publication/268032521>
- Société de Services aux Entreprises Technologiques et Industrielles. (2022). *La SSETI*. <https://sseti.fr/la-sseti/>
- Srai, J. S., & Lorentz, H. (2019). Developing design principles for the digitalisation of purchasing and supply management. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 25(1), 78–98. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2018.07.001>
- Sternad, M., Lerher, T., & Gajsek, B. (2018). Maturity levels for logistics 4.0 based on NRW's industry 4.0 maturity model. *18th International Scientific Conference Business Logistics in Modern Management*, 695–708.
- Stoneman, P., & Kwon, M.-J. (1994). The Diffusion of Multiple Process Technologies. *The Economic Journal*, 104(423), 420–431. <https://doi.org/10.2307/2234761>
- Strandhagen, J. O., Vallandingham, L. R., Fragapane, G., Strandhagen, J. W., Stangeland, A. B. H., & Sharma, N. (2017). Logistics 4.0 and emerging sustainable business models. *Advances in Manufacturing*, 5, 359–369.
- Strandhagen, J. W., Alfnes, E., Strandhagen, J. O., & Vallandingham, L. R. (2017). The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics-a multiple case study. *Advances in Manufacturing*, 5, 344–358.
- Sun, M., Vidalakis, C., & Oza, T. (2009). A Change Management Maturity Model for Construction Projects. *Proceedings 25th Annual ARCOM Conference*, 803, 803–812.

- 
- Tao, F., & Qi, Q. (2019). New IT driven service-oriented smart manufacturing: Framework and characteristics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(1), 81–91. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2723764>
- Tokola, H., Gröger, C., Järvenpää, E., & Niemi, E. (2016). Designing Manufacturing Dashboards on the Basis of a Key Performance Indicator Survey. *Procedia CIRP*, 57, 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.107>
- Torbacki, W., & Kijewska, K. (2019). Identifying key performance indicators to be used in logistics 4.0 and industry 4.0 for the needs of sustainable municipal logistics by means of the DEMATEL method. *Transportation Research Procedia*, 39, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.055>
- Tracey, M. (1998). The Importance of Logistics Efficiency to Customer Service and Firm Performance. *The International Journal of Logistics Management*, 9(2), 65–81. <https://doi.org/10.1108/09574099810805843>
- Tracey, M., Vonderembse, M. A., & Lim, J.-S. (1999). Manufacturing technology and strategy formulation: keys to enhancing competitiveness and improving performance. In *Journal of Operations Management* (Vol. 17).
- Trstenjak, M., & Cosic, P. (2017). Process Planning in Industry 4.0 Environment. *Procedia Manufacturing*, 11, 1744–1750. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.303>
- Tseng, M. M., Jiao, J., & Merchant, M. E. (1996). Design for Mass Customization. *CIRP Annals*, 45(1), 153–156.
- Tseng, M. M., Wang, Y., & Jiao, R. J. (2017). Mass Customization. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7\\_16701-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16701-3)
- Tu, Y., Chu, X., & Yang, W. (2000). Computer-aided process planning in virtual one-of-a-kind production. *Computers in Industry*, 41(1), 99–110. [www.elsevier.nl/locate/comprod](http://www.elsevier.nl/locate/comprod)
- Turner, C. J., Emmanouilidis, C., Tomiyama, T., Tiwari, A., & Roy, R. (2019). Intelligent decision support for maintenance: an overview and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(10), 936–959. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667033>
- Tzokas, N., Hultink, E. J., & Hart, S. (2004). Navigating the new product development process. *Industrial Marketing Management*, 33(7), 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2003.09.004>
- UIMM Lorraine. (2022). *Rôle et missions de l'UIMM Lorraine*. <https://uimm-lorraine.com/role-et-missions-de-luimm-lorraine/>
- Union des Industries et Métiers de la Métallurgie. (2022). *l'UIMM au cœur de l'industrie*. <https://uimm.lafabriquedelavenir.fr/luimm-au-coeur-de-lindustrie/>
- Vinardi, C. (2019). *Les défis du Lean à l'ère de la mondialisation et de l'Industrie 4.0*. Université de Technologie de Compiègne.
- Wagire, A. A., Joshi, R., Rathore, A. P. S., & Jain, R. (2021). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. *Production Planning and Control*, 32(8), 603–622. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1744763>
-

- 
- Wahab, A. N. A., Mukhtar, M., & Sulaiman, R. (2013). A Conceptual Model of Lean Manufacturing Dimensions. *Procedia Technology*, *11*, 1292–1298. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.327>
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, *16*(20), 7373–7380. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2565621>
- Wan, J., Yang, J., Wang, Z., & Hua, Q. (2018). Artificial Intelligence for Cloud-Assisted Smart Factory. *IEEE Access*, *6*, 55419–55430. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2871724>
- White, R. E. (1990). *Postimplementation evaluation of just-in-time manufacturing*. Arizona State University ProQuest Dissertations Publishing.
- Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., & Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, *61*, 530–535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., & Perona, M. (2021). The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, *59*(6), 1922–1954. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, *3*(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Žižek, S. Š., Nedelko, Z., Mulej, M., & Čič, Ž. V. (2020). Key Performance Indicators and Industry 4.0 – A Socially Responsible Perspective. *Naše gospodarstvo/Our Economy*, *66*(3), 22–35. <https://doi.org/10.2478/ngoe-2020-0015>
- Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0 - the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*, *32*(4), 614–626. <https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744>

---

## Annexes

---

<b>ANNEXE A : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURITE ET DES RESULTATS DU PREMIER CAS D'ETUDE.....</b>	<b>163</b>
A. IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE.....	163
B. MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT.....	164
C. MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURITE DES PROCESSUS.....	166
D. MESURE DES NIVEAUX DE MATURITE TECHNOLOGIQUE.....	172
E. DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER.....	178
<b>ANNEXE B : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURITE ET DES RESULTATS DU DEUXIEME CAS D'ETUDE.....</b>	<b>180</b>
A. IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE.....	180
B. MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT.....	181
C. MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURITE DES PROCESSUS.....	183
D. MESURE DES NIVEAUX DE MATURITE TECHNOLOGIQUE.....	189
E. DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER.....	197
<b>ANNEXE C : DETAIL DES NIVEAUX DE MATURITE ET DES RESULTATS DU TROISIEME CAS D'ETUDE.....</b>	<b>199</b>
A. IDENTIFICATION DE LA TYPOLOGIE DE PRODUCTION DE L'ENTREPRISE.....	199
B. MESURE DES NIVEAUX DE LA CAPACITE DE CONDUITE DU CHANGEMENT.....	200
C. MESURE DES NIVEAUX DE LA MATURITE DES PROCESSUS.....	202
D. MESURE DES NIVEAUX DE MATURITE TECHNOLOGIQUE.....	208
E. DETAIL DES NIVEAUX MESURES PAR PRATIQUE ET IDENTIFICATION DES PRATIQUES A RENFORCER.....	216

## Annexe A : Détail des niveaux de maturité et des résultats du premier cas d'étude

Nous présentons dans cette annexe le détail des réponses et des résultats du premier cas d'études sur notre prototype fonctionnel de notre outil.

La première partie présente les réponses aux questions ayant permis l'identification de la typologie de production de l'entreprise. Les parties suivantes présente les réponses sur les différentes grilles de maturité de nos trois dimensions. Enfin, nous présentons le détail des niveaux mesurés pour chaque pratique et l'identification des pratiques les plus faibles, qui seront celles mises en avant comme devant être améliorées en priorité.

### a. Identification de la typologie de production de l'entreprise

Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ?	
Oui	Non
	X

Avez-vous la capacité d'introduire de la personnalisation sans interruption de la production ?	
Oui	Non
X	

Avec ces réponses, la typologie de production identifiée était une production en One-Piece Flow.

## b. Mesure des niveaux de la capacité de conduite du changement

<b>IMPLICATION DE LA DIRECTION</b>	<b>Implication directe</b>	Pas ou peu de support de la direction ; faible présence durant les réunions de l'équipe projet	Un porteur de projet auprès de la direction est nommé, mais est peu impliqué ou pas assez influent pour défendre efficacement le projet ; présence de représentants de la direction aux réunions de projets régulières mais pas systématiques	Un porteur de projet avec une réelle influence au niveau de la direction est nommé ; l'implication de la direction est visible pour toute l'entreprise, à toutes les étapes du projet, même après l'implantation ; présence systématique aux réunions du groupe projet
			X	
	<b>Mise à disposition des ressources</b>	Le changement est lancé et des équipes sont impliquées uniquement lorsque les tâches opérationnelles laissent du temps libre ; il y a des problèmes réguliers de ressources (personnelles ou matérielles) ; il est difficile de mettre en place les formations nécessaires pour les équipes	Les tâches opérationnelles rentrent parfois en conflit avec l'avancée du projet ; il y a des problèmes ponctuels de ressources humaines ou matérielles ; des formations sont lancées lorsque les tâches opérationnelles en laissent le temps	Il n'y a aucun problème de ressources humaines ou matérielles sur tout le déroulement des projets de changement ; des ressources spécifiques (en temps et en moyen) sont dédiées à la formation des équipes systématiquement à chaque projet
			X	

<b>METHODOLOGIE</b>	<b>Communication</b>	Peu de personnes dans la structure connaissent l'importance des projets de changement, leur avancement ou leurs impacts réels; leur intérêt n'est pas évident pour la plupart du personnel; La communication est très majoritairement descendant; il n'y a pas de canal formel pour de la communication montante	Les personnes directement concernées sont au courant de l'avancement des projets de transformation, mais pas forcément le reste du personnel; des canaux formels sont toujours en place pour de la communication descendante; des communications montantes peuvent être ponctuellement mis en place	Tout ou presque tout le personnel est au courant des projets de transformation, de leur intérêt et de leurs impacts; des canaux formels sont en permanence en place pour des communications dans les deux sens
				X
	<b>Gestion de projet</b>	Des techniques de gestion de projet ne sont jamais ou rarement mis en œuvre; pas ou peu de personnes sont formées à ces techniques; il n'y a pas d'équipes claires pour conduire les projets de changement; il n'y a pas de processus ou de tâches clairement établis pour la conduite du changement, l'identification ou la mise en place des formations nécessaires aux équipes concernées par le changement	Une équipe est fixée avec un pilote de projet; le pilote connaît et applique régulièrement des outils de gestion de projets; le processus intègre systématiquement des étapes d'identification et de mise en place des formations nécessaires pour les équipes concernées par le changement	Une méthodologie de gestion de projets est établie maîtrisée et systématiquement appliquée pour tous les projets de transformation; chaque fin de projet est l'occasion de retours d'expériences et d'ajustements, dans une démarche d'amélioration continue
			X	

### c. Mesure des niveaux de la maturité des processus

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Les ordres de production sont lancés sans règles claires de priorisation, de manière poussée ; il n'y a pas de capacité de modification de la planification sur un cycle de production déjà entamé	Des règles de priorisation formelles sont définies ; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, permettant une certaine prise en compte des retards reportés	Des règles de priorisation formelles sont définies; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, et l'avancement est suivi grâce à des indicateurs, permettant des ajustements rapides de la planification	Les ordres de fabrication sont attribués de manière flexible, avec une prise en compte des spécificités des commandes et des caractéristiques des machines de production, afin d'optimiser les temps de fonctionnement et d'offrir une grande flexibilité
					X
	<b>Pilotage opérationnel et contrôle de la production</b>	La production est réalisée sans réel pilotage, et il n'y a pas d'objectifs formels autre que "produire"	La production est pilotée en suivant des objectifs formels, prenant en compte les capacités de production du système	Des indicateurs permettent le suivi de l'avancement de la production, fournissant les données nécessaires au lancement rapide de plans d'action, suivant une méthodologie maîtrisée	Le système de production est suivi et piloté en temps réel, permettant de lancer les actions de correction dès que c'est utile
					X

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion du stock et des réapprovisionnements</b>	Les commandes de pièces ou de matières premières sont déclenchées si des besoins sont constatés; il n'y a pas de pratiques formalisées ou systématiques pour suivre l'état des stocks	Des niveaux de stocks hauts et bas ont été définis; les stocks sont suivis et les commandes sont lancées lorsque les niveaux bas sont atteints	Des indicateurs pour effectuer le suivi des stocks sont définis et suivis; les prévisions de vente et de production sont intégrées au suivi des stocks pour adapter les commandes	Le système de gestion de l'inventaire met en place des indicateurs pour suivre au plus près la consommation réelle pour optimiser les commandes et les stocks
				X	
	<b>Logistique interne et approvisionnement de la production</b>	L'alimentation des lignes de production a uniquement lieu lorsque des besoins sont constatés; Aucun standard n'a été défini pour la préparation à l'approvisionnement	Pour déclencher le réapprovisionnement des lignes de production, des niveaux minimaux ont été définis et mis en place; Les pièces sont mises en départ de ligne très en amont de leur consommation	Les niveaux minimum et maximum sont fixés pour l'approvisionnement des lignes de production; Les besoins de composants sont groupés pour faire des lots d'alimentation de lignes en fonction de la planification	Les niveaux fixés pour l'alimentation des lignes de production sont préparés en fonction de la planification de la production, puis adaptée en direct par rapport à la consommation réelle; Les pièces sont apportées au moment où elles sont nécessaires, suivant les besoins en temps réel
				X	

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs</b>	La communication avec les fournisseurs et les clients est uniquement en place à travers le passage des commandes, avec des relations très descendantes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle pour des sujets simples, comme les retards ou l'avancement des commandes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle, des pratiques pour chercher à améliorer le fonctionnement logistique sont en place avec les uns ou les autres	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de façon à permettre une recherche commune d'optimisation du fonctionnement logistique
			X		

<b>MAINTENANCE</b>	La maintenance est mise en place de manière corrective, uniquement en cas de défaillance de machines ou d'équipements	Certaines pratiques de maintenance préventive ont été mises en place, planifiée sur une régularité temporelle ou à la suite de constatation de dégradation des équipements	Une maintenance préventive est mise en place, planifiée grâce aux suivis d'indicateurs machines, à des conditions de déclenchement formalisées, et des contrôles réguliers ; certaines tâches basiques d'entretien des machines peuvent parfois être réalisées de manière autonome par les opérateurs de production	Un processus de maintenance prédictive est mise en place, basé sur un suivi d'indicateurs et de paramètres machines permettant la détection à l'avance et le traitement préventif de futures défaillances potentielles ; les opérateurs de production sont responsables des tâches d'entretien de routine et sont sensibilisés à l'importance de communiquer sur l'observation de défaillances potentielles
				X

<b>QUALITE</b>	<b>Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité</b>	La fonction qualité n'est pas clairement définie au sein de l'entreprise, ne renvoie pas à des responsabilités clairement établies ; elle est uniquement à la charge du dirigeant	La fonction qualité est définie formellement, et est associée à un ou des responsables et/ou une équipe dédiée, chargés de son application	La fonction qualité est associée à des objectifs, des indicateurs et des mesures clairement définis ; certaines tâches simples du processus qualité sont confiées à d'autres personnes que les membres de l'équipe "qualité" (ex: des opérateurs de production)	Tout le personnel est impliqué dans l'application du processus qualité ; Le suivi de la qualité est mené à travers tous les processus de l'entreprise
					X
	<b>Pilotage opérationnel de la qualité</b>	Il n'y a pas de gestion formalisée de la qualité; les contrôles qualité de la production ne sont pas conduits de manière systématisés	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; une démarche de contrôle qualité postérieur à la production est systématisé	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production; des méthodes formalisées et maîtrisées permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production, et permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates; des actions de prévention de défauts potentiels peuvent être identifiées et mise en place au préalable, dans une dynamique d'amélioration continue
				X	

QUALITE	<b>Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité</b>	L'application des spécifications des clients et la gestion des retours se fait sur le tas, sans processus formellement défini	Un processus formel a été établi pour la prise en compte des spécifications des clients et pour la gestion des retours	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'améliorations ponctuelles de la production et de son process pour atteindre les exigences clients	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'amélioration continue
			X		

	Présence d'un processus de conception	Oui		Non	
				X	
<b>CONCEPTION</b>	<b>Pilotage du processus de conception</b>	La conception de nouveaux produits ou processus ne fait pas l'objet d'un processus défini	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini et appliqué pour chaque nouveau projet	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive; des pratiques de gestion des connaissances et de retours d'expérience permettent d'améliorer le processus à chaque projet; Le processus intègre des acteurs d'autres départements de l'entreprise ou extérieurs à l'entreprise durant certaines phases de conception

d. **Mesure des niveaux de maturité technologique**

<b>QUALITE</b>	<b>Détection de défauts de production</b>	Détection de défauts de qualité par capteurs mécaniques	Détections de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques, sur pièce à posteriori de la production	Détection de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques connectés, en temps réel de la production	Détection de défauts de qualité dans la production avec automatisation des actions de correction et ajustement autonomes des paramètres machines
				X	
	<b>Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité</b>	Traitement "manuel" des données pour le suivi de la qualité	Traitement numérique automatisé des données "qualité" pour le suivi de la qualité importées manuellement	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi de la qualité des processus de production	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi et contrôle de la qualité des processus de production (Big Data) et correction automatisée du processus de suivi
				X	
	<b>Procédure de contrôle visuel de la qualité</b>	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire à rechercher manuellement	contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique non interactif	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique connecté interactif	Contrôle visuel numérique de la qualité via mode opératoire en RA
				X	

<b>MAINTENANCE</b>	<b>Acquisition et traitement des données pour la maintenance</b>	Acquisition de valeurs techniques de maintenance	Acquisition de données industrielles non structurées transférables pour analyse de la maintenance	Acquisition de données industrielles et structuration pour analyse de la maintenance	Suivi de la santé des machines de l'atelier, apprentissage pour la qualification et la prédiction des pannes
			X		
	<b>Suivi des opérations de maintenance</b>	Relevé manuel des données de maintenance et suivi non informatisé	Suivi informatique des tâches de maintenance (support informatique de GMAO)	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO, permettant la détection automatique des besoins et des tâches de maintenance
			X		
	<b>Guidage des opérateurs de maintenance</b>	Modes opératoires non informatisés	Support informatique pour les modes opératoires de maintenance	Support numérique interactifs pour le guidage des tâches manuelles de maintenance	Technologies de visualisation pour le guidage automatisé des tâches manuelles de maintenance
		X			
	<b>Formations des opérateurs de maintenance</b>	Pas de technologies numériques pour la formation des opérateurs de maintenance	Système numérique pour la formation des équipes à la maintenance	Système numérique interactif pour le guidage pour la formation des équipes à la maintenance	Guidage par logiciel de visualisation pour la formation à la maintenance
		X			

LOGISTIQUE	<b>Guidage des opérateurs logistiques</b>	Organisation non informatisée pour la gestion du guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique non connecté	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique connecté	Gestion de la préparation des commandes piloté automatiquement et soutien à la préparation des pièces et commandes par réalité augmentée
				X	
	<b>Technologies pour le transport des pièces/produits</b>	Utilisation de technologies non numériques (fenwick, transpalette, ...)		Transports internes autonomes dans leurs déplacements, alimentés manuellement	Automatisation des transports internes, de l'alimentation des lignes et de la manutention
		X			
	<b>Technologies pour la gestion du magasin</b>	Pas de technologies numériques pour la gestion du magasin	Utilisation de technologies numériques pour la gestion du magasin, mais manutention manuelle des pièces et matériaux	Systèmes de rangements autonomes du magasin, avec échanges manuels entre ceux-ci et les technologies de transports	Systèmes de rangements autonomes du magasin capables d'interagir automatiquement avec les technologies de transports
			X		
	<b>Technologies de suivi des pièces et matériaux</b>	Pas de technologies numériques dédiées au suivi des pièces et matériaux	Identification et suivi d'éléments par recherche de référence sur support informatique, mise à jour manuelle des données	Identification et suivi des éléments par scan manuel et mise à jour automatique des données	Identification et suivi autonome des éléments par scan automatique et mise à jour automatique des données
				X	

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Suivi et traitement des données de logistique</b>	Collecte et suivi manuels des données de logistique	Réception et intégration des données de logistique, incluant le plan des stockages de matériaux, sur support numérique	Collecte automatique des données et simulation des flux de matériaux	Simulation des flux de matériaux en temps réel et guidage automatique pour rangement et allocation des matériaux
			X		
	<b>Gestion des commandes fournisseurs</b>	Planification manuelle des commandes	Proposition automatique de planification de l'expédition des commandes en fonction du niveau de stock	Proposition et transmission automatique de planification de l'expédition des commandes (système d'envoi automatique des commandes après validation)	Proposition et transmission automatique des planifications de l'expédition des commandes, avec mise à jour en temps réel
				X	
	<b>Gestion et prévision des commandes clients</b>	Gestion manuelle des commandes clients ; pas de pratiques de prévision des commandes clients	Evaluation et prévision de la demande par traitement manuel de données numériques	Evaluation et prévisions avancées de la demande	Evaluation prédictive de la demande, mise à jour en temps réel
					X

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Planification manuelle sur support non informatisé	Planification numérique non automatisé de la production ou planification numérique automatisée sans intégration des données de production	Planification numérique de la production automatisée avec prise en compte des données de statut de la production	Planification numérique automatisée de la production intégrant les données en temps du système de production pour proposer des corrections en cas de détection de dérives
				X	
	<b>Suivi et traitement des données de production</b>	Mesures par capteurs et collecte des données manuellement ou via les interfaces des machines de production	Collecte et centralisation numériques des données du système de production	Collecte et centralisation numérique des données du système de production en temps réel	Collecte et traitement automatisé des données des processus en temps réel, pouvant permettre la mise en place de rétroaction
				X	
	<b>Guidage des opérateurs de production</b>	Utilisation de modes opératoires non informatiques pour le guidage des tâches	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires sur interfaces numériques	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires avec suivi autonome des tâches	Guidage automatisé visuel pour les tâches manuelles des opérateurs
				X	

<b>PRODUCTION</b>	<b>Machines du système de production</b>	Pas d'automatisation ; Machines de production traditionnelles non numériques	Automatisation de tâches individuelles de production ; Machines à commandes numériques, pilotées sur pupitre	Automatisation de suites de tâches importantes des processus de production (type changement d'outils, lignes automatisées, ...) ; Machines à commande numérique, avec Fabrication Assistée par Ordinateur	Mise en place de technologies de production autonomes intelligentes, capables de s'adapter automatiquement à différentes situations (ex : robots)
			X		
	<b>Assistance et collaboration technologique</b>	Collaboration technologie et Homme séparée sans interface commune	Assistance technologique manuelle pour les tâches manuelles type exosquelette, préhenseur...)	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains avec intelligences artificielles et adaptation des mouvements
			X		

### e. Détail des niveaux mesurés par pratique et identification des pratiques à renforcer

Les pratiques les plus faibles de chaque axe, qui seront celles indiquées comme devant être améliorées en priorité, sont surlignées en rouge.

Conduite du changement	Implication de la direction	Implication directe	2
		Mise à disposition des ressources	2
	Méthodologie	Communication	3
		Gestion de projet	2

Maturité des processus	Production	Planification de la production	4
		Pilotage opérationnel et contrôle de la production	4
	Logistique	Gestion du stock et des réapprovisionnements	3
		Logistique interne et approvisionnement de la production	3
		Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs	2
	Qualité	Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité	4
		Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité	2
		Pilotage opérationnel de la qualité	3
	Maintenance		4
	Conception	Existence processus	Non
Pilotage du processus de conception		X	

Maturité technologique	Qualité	Détection de défauts de production	3
		Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité	3
		Procédure de contrôle visuel de la qualité	3
	Conception	Réalisation des tests sur prototypes	X
		Représentation/modélisation des pièces et produits	X
		Capacité de conception collective	X
		Technologies dédiées au prototypage	X
		Virtualisation de pièces physiques	X
		Acquisition de données utilisateurs pour la conception	X
	Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	2
		Suivi des opérations de maintenance	2
		Guidage des opérateurs de maintenance	1
		Formations des opérateurs de maintenance	1
	Logistique	Guidage des opérateurs logistiques	3
		Technologies pour le transport des pièces/produits	1
		Technologies pour la gestion du magasin	2
		Technologies de suivi des pièces et matériaux	3
		Suivi et traitement des données de logistique	2
		Gestion des commandes fournisseurs	3
		Gestion et prévision des commandes clients	4
	Production	Planification de la production	3
		Suivi et traitement des données de production	3
		Guidage des opérateurs de production	3
Machines du système de production		2	
Assistance et collaboration technologique		2	

## Annexe B : Détail des niveaux de maturité et des résultats du deuxième cas d'étude

Nous présentons dans cette annexe le détail des réponses et des résultats du deuxième cas d'études sur notre prototype fonctionnel de notre outil.

La première partie présente les réponses aux questions ayant permis l'identification de la typologie de production de l'entreprise. Les parties suivantes présente les réponses sur les différentes grilles de maturité de nos trois dimensions. Enfin, nous présentons le détail des niveaux mesurés pour chaque pratique et l'identification des pratiques les plus faibles, qui seront celles mises en avant comme devant être améliorées en priorité.

### a. Identification de la typologie de production de l'entreprise

Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ?	
Oui	Non
X	

Avez-vous une récurrence de la réalisation de certains produits ?	
Oui	Non
	X

Avec ces réponses, la typologie de production identifiée était une production par projets.

## b. Mesure des niveaux de la capacité de conduite du changement

<b>IMPLICATION DE LA DIRECTION</b>	<b>Implication directe</b>	Pas ou peu de support de la direction ; faible présence durant les réunions de l'équipe projet	Un porteur de projet auprès de la direction est nommé, mais est peu impliqué ou pas assez influent pour défendre efficacement le projet ; présence de représentants de la direction aux réunions de projets régulières mais pas systématiques	Un porteur de projet avec une réelle influence au niveau de la direction est nommé ; l'implication de la direction est visible pour toute l'entreprise, à toutes les étapes du projet, même après l'implantation ; présence systématique aux réunions du groupe projet
			X	
	<b>Mise à disposition des ressources</b>	Le changement est lancé et des équipes sont impliquées uniquement lorsque les tâches opérationnelles laissent du temps libre ; il y a des problèmes réguliers de ressources (personnelles ou matérielles) ; il est difficile de mettre en place les formations nécessaires pour les équipes	Les tâches opérationnelles rentrent parfois en conflit avec l'avancée du projet ; il y a des problèmes ponctuels de ressources humaines ou matérielles ; des formations sont lancées lorsque les tâches opérationnelles en laissent le temps	Il n'y a aucun problème de ressources humaines ou matérielles sur tout le déroulement des projets de changement ; des ressources spécifiques (en temps et en moyen) sont dédiées à la formation des équipes systématiquement à chaque projet
		X		

<b>METHODOLOGIE</b>	<b>Communication</b>	<p>Peu de personnes dans la structure connaissent l'importance des projets de changement, leur avancement ou leurs impacts réels; leur intérêt n'est pas évident pour la plupart du personnel; La communication est très majoritairement descendant; il n'y a pas de canal formel pour de la communication montante</p>	<p>Les personnes directement concernées sont au courant de l'avancement des projets de transformation, mais pas forcément le reste du personnel; des canaux formels sont toujours en place pour de la communication descendante; des communications montantes peuvent être ponctuellement mis en place</p>	<p>Tout ou presque tout le personnel est au courant des projets de transformation, de leur intérêt et de leurs impacts; des canaux formels sont en permanence en place pour des communications dans les deux sens</p>
		X		
	<b>Gestion de projet</b>	<p>Des techniques de gestion de projet ne sont jamais ou rarement mis en œuvre; pas ou peu de personnes sont formées à ces techniques; il n'y a pas d'équipes claires pour conduire les projets de changement; il n'y a pas de processus ou de tâches clairement établis pour la conduite du changement, l'identification ou la mise en place des formations nécessaires aux équipes concernées par le changement</p>	<p>Une équipe est fixée avec un pilote de projet; le pilote connaît et applique régulièrement des outils de gestion de projets; le processus intègre systématiquement des étapes d'identification et de mise en place des formations nécessaires pour les équipes concernées par le changement</p>	<p>Une méthodologie de gestion de projets est établie maîtrisée et systématiquement appliquée pour tous les projets de transformation; chaque fin de projet est l'occasion de retours d'expériences et d'ajustements, dans une démarche d'amélioration continue</p>
		X		

### c. Mesure des niveaux de la maturité des processus

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Les ordres de production sont lancés sans règles claires de priorisation, de manière poussée ; il n'y a pas de capacité de modification de la planification sur un cycle de production déjà entamé	Des règles de priorisation formelles sont définies ; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, permettant une certaine prise en compte des retards reportés	Des règles de priorisation formelles sont définies; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, et l'avancement est suivi grâce à des indicateurs, permettant des ajustements rapides de la planification	Les ordres de fabrication sont attribués de manière flexible, avec une prise en compte des spécificités des commandes et des caractéristiques des machines de production, afin d'optimiser les temps de fonctionnement et d'offrir une grande flexibilité
			X		
	<b>Pilotage opérationnel et contrôle de la production</b>	La production est réalisée sans réel pilotage, et il n'y a pas d'objectifs formels autre que "produire"	La production est pilotée en suivant des objectifs formels, prenant en compte les capacités de production du système	Des indicateurs permettent le suivi de l'avancement de la production, fournissant les données nécessaires au lancement rapide de plans d'action, suivant une méthodologie maîtrisée	Le système de production est suivi et piloté en temps réel, permettant de lancer les actions de correction dès que c'est utile
		X			

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion du stock et des réapprovisionnements</b>	Les commandes de pièces ou de matières premières sont déclenchées si des besoins sont constatés; il n'y a pas de pratiques formalisées ou systématiques pour suivre l'état des stocks	Des niveaux de stocks hauts et bas ont été définis; les stocks sont suivis et les commandes sont lancées lorsque les niveaux bas sont atteints	Des indicateurs pour effectuer le suivi des stocks sont définis et suivis; les prévisions de vente et de production sont intégrées au suivi des stocks pour adapter les commandes	Le système de gestion de l'inventaire met en place des indicateurs pour suivre au plus près la consommation réelle pour optimiser les commandes et les stocks
		X			X
	<b>Logistique interne et approvisionnement de la production</b>	L'alimentation des lignes de production a uniquement lieu lorsque des besoins sont constatés; Aucun standard n'a été défini pour la préparation à l'approvisionnement	Pour déclencher le réapprovisionnement des lignes de production, des niveaux minimaux ont été définis et mis en place; Les pièces sont mises en départ de ligne très en amont de leur consommation	Les niveaux minimum et maximum sont fixés pour l'approvisionnement des lignes de production; Les besoins de composants sont groupés pour faire des lots d'alimentation de lignes en fonction de la planification	Les niveaux fixés pour l'alimentation des lignes de production sont préparés en fonction de la planification de la production, puis adaptée en direct par rapport à la consommation réelle; Les pièces sont apportées au moment où elles sont nécessaires, suivant les besoins en temps réel
			X		

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs</b>	La communication avec les fournisseurs et les clients est uniquement en place à travers le passage des commandes, avec des relations très descendantes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle pour des sujets simples, comme les retards ou l'avancement des commandes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle, des pratiques pour chercher à améliorer le fonctionnement logistique sont en place avec les uns ou les autres	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de façon à permettre une recherche commune d'optimisation du fonctionnement logistique
		X			

<b>MAINTENANCE</b>	La maintenance est mise en place de manière corrective, uniquement en cas de défaillance de machines ou d'équipements	Certaines pratiques de maintenance préventive ont été mises en place, planifiée sur une régularité temporelle ou à la suite de constatation de dégradation des équipements	Une maintenance préventive est mise en place, planifiée grâce aux suivis d'indicateurs machines, à des conditions de déclenchement formalisées, et des contrôles réguliers; certaines tâches basiques d'entretien des machines peuvent parfois être réalisées de manière autonome par les opérateurs de production	Un processus de maintenance prédictive est mise en place, basé sur un suivi d'indicateurs et de paramètres machines permettant la détection à l'avance et le traitement préventif de futures défaillances potentielles; les opérateurs de production sont responsables des tâches d'entretien de routine et sont sensibilisés à l'importance de communiquer sur l'observation de défaillances potentielles
		X		

<b>QUALITE</b>	<b>Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité</b>	La fonction qualité n'est pas clairement définie au sein de l'entreprise, ne renvoie pas à des responsabilités clairement établies; elle est uniquement à la charge du dirigeant	La fonction qualité est définie formellement, et est associée à un ou des responsables et/ou une équipe dédiée, chargés de son application	La fonction qualité est associée à des objectifs, des indicateurs et des mesures clairement définis; certaines tâches simples du processus qualité sont confiées à d'autres personnes que les membres de l'équipe "qualité" (ex: des opérateurs de production)	Tout le personnel est impliqué dans l'application du processus qualité; Le suivi de la qualité est mené à travers tous les processus de l'entreprise
		X			
	<b>Pilotage opérationnel de la qualité</b>	Il n'y a pas de gestion formalisée de la qualité; les contrôles qualité de la production ne sont pas conduits de manière systématisés	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; une démarche de contrôle qualité postérieur à la production est systématisé	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production; des méthodes formalisées et maîtrisées permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production, et permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates; des actions de prévention de défauts potentiels peuvent être identifiées et mise en place au préalable, dans une dynamique d'amélioration continue
			X		

<b>QUALITE</b>	<b>Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité</b>	L'application des spécifications des clients et la gestion des retours se fait sur le tas, sans processus formellement défini	Un processus formel a été établi pour la prise en compte des spécifications des clients et pour la gestion des retours	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'améliorations ponctuelles de la production et de son process pour atteindre les exigences clients	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'amélioration continue
				X	

	Présence d'un processus de conception	Oui		Non	
		X			
<b>CONCEPTION</b>	<b>Pilotage du processus de conception</b>	La conception de nouveaux produits ou processus ne fait pas l'objet d'un processus défini	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini et appliqué pour chaque nouveau projet	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive; des pratiques de gestion des connaissances et de retours d'expérience permettent d'améliorer le processus à chaque projet; Le processus intègre des acteurs d'autres départements de l'entreprise ou extérieurs à l'entreprise durant certaines phases de conception
		X			

d. **Mesure des niveaux de maturité technologique**

<b>QUALITE</b>	<b>Détection de défauts de production</b>	Détection de défauts de qualité par capteurs mécaniques	Détections de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques, sur pièce à posteriori de la production	Détection de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques connectés, en temps réel de la production	Détection de défauts de qualité dans la production avec automatisation des actions de correction et ajustement autonomes des paramètres machines
		X			
	<b>Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité</b>	Traitement "manuel" des données pour le suivi de la qualité	Traitement numérique automatisé des données "qualité" pour le suivi de la qualité importées manuellement	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi de la qualité des processus de production	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi et contrôle de la qualité des processus de production (Big Data) et correction automatisée du processus de suivi
		X			
	<b>Procédure de contrôle visuel de la qualité</b>	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire à rechercher manuellement	contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique non interactif	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique connecté interactif	Contrôle visuel numérique de la qualité via mode opératoire en RA
		X			

<b>MAINTENANCE</b>	<b>Acquisition et traitement des données pour la maintenance</b>	Acquisition de valeurs techniques de maintenance	Acquisition de données industrielles non structurées transférables pour analyse de la maintenance	Acquisition de données industrielles et structuration pour analyse de la maintenance	Suivi de la santé des machines de l'atelier, apprentissage pour la qualification et la prédiction des pannes
			X		
	<b>Suivi des opérations de maintenance</b>	Relevé manuel des données de maintenance et suivi non informatisé	Suivi informatique des tâches de maintenance (support informatique de GMAO)	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO, permettant la détection automatique des besoins et des tâches de maintenance
		X			
	<b>Guidage des opérateurs de maintenance</b>	Modes opératoires non informatisés	Support informatique pour les modes opératoires de maintenance	Support numérique interactifs pour le guidage des tâches manuelles de maintenance	Technologies de visualisation pour le guidage automatisé des tâches manuelles de maintenance
		X			
	<b>Formations des opérateurs de maintenance</b>	Pas de technologies numériques pour la formation des opérateurs de maintenance	Système numérique pour la formation des équipes à la maintenance	Système numérique interactif pour le guidage pour la formation des équipes à la maintenance	Guidage par logiciel de visualisation pour la formation à la maintenance
		X			

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Guidage des opérateurs logistiques</b>	Organisation non informatisée pour la gestion du guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique non connecté	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique connecté	Gestion de la préparation des commandes piloté automatiquement et soutien à la préparation des pièces et commandes par réalité augmentée
		X			
	<b>Technologies pour le transport des pièces/produits</b>	Utilisation de technologies non numériques (fenwick, transpalette,...)		Transports internes autonomes dans leurs déplacements, alimentés manuellement	Automatisation des transports internes, de l'alimentation des lignes et de la manutention
		X			
	<b>Technologies pour la gestion du magasin</b>	Pas de technologies numériques pour la gestion du magasin	Utilisation de technologies numériques pour la gestion du magasin, mais manutention manuelle des pièces et matériaux	Systèmes de rangements autonomes du magasin, avec échanges manuels entre ceux-ci et les technologies de transports	Systèmes de rangements autonomes du magasin capables d'interagir automatiquement avec les technologies de transports
			X		
	<b>Technologies de suivi des pièces et matériaux</b>	Pas de technologies numériques dédiées au suivi des pièces et matériaux	Identification et suivi d'éléments par recherche de référence sur support informatique, mise à jour manuelle des données	Identification et suivi des éléments par scan manuel et mise à jour automatique des données	Identification et suivi autonome des éléments par scan automatique et mise à jour automatique des données
			X		X

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Suivi et traitement des données de logistique</b>	Collecte et suivi manuels des données de logistique	Réception et intégration des données de logistique, incluant le plan des stockages de matériaux, sur support numérique	Collecte automatique des données et simulation des flux de matériaux	Simulation des flux de matériaux en temps réel et guidage automatique pour rangement et allocation des matériaux
			X		
	<b>Gestion des commandes fournisseurs</b>	Planification manuelle des commandes	Proposition automatique de planification de l'expédition des commandes en fonction du niveau de stock	Proposition et transmission automatique de planification de l'expédition des commandes (système d'envoi automatique des commandes après validation)	Proposition et transmission automatique des planifications de l'expédition des commandes, avec mise à jour en temps réel
		X			
	<b>Gestion et prévision des commandes clients</b>	Gestion manuelle des commandes clients ; pas de pratiques de prévision des commandes clients	Evaluation et prévision de la demande par traitement manuel de données numériques	Evaluation et prévisions avancées de la demande	Evaluation prédictive de la demande, mise à jour en temps réel
			X		

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Planification manuelle sur support non informatisé	Planification numérique non automatisé de la production ou planification numérique automatisée sans intégration des données de production	Planification numérique de la production automatisée avec prise en compte des données de statut de la production	Planification numérique automatisée de la production intégrant les données en temps du système de production pour proposer des corrections en cas de détection de dérives
		X			
	<b>Suivi et traitement des données de production</b>	Mesures par capteurs et collecte des données manuellement ou via les interfaces des machines de production	Collecte et centralisation numériques des données du système de production	Collecte et centralisation numérique des données du système de production en temps réel	Collecte et traitement automatisé des données des processus en temps réel, pouvant permettre la mise en place de rétroaction
		X			
	<b>Guidage des opérateurs de production</b>	Utilisation de modes opératoires non informatiques pour le guidage des tâches	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires sur interfaces numériques	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires avec suivi autonome des tâches	Guidage automatisé visuel pour les tâches manuelles des opérateurs
		X			

<b>PRODUCTION</b>	<b>Machines du système de production</b>	Pas d'automatisation ; Machines de production traditionnelles non numériques	Automatisation de tâches individuelles de production ; Machines à commandes numériques, pilotées sur pupitre	Automatisation de suites de tâches importantes des processus de production (type changement d'outils, lignes automatisées, ...) ; Machines à commande numérique, avec Fabrication Assistée par Ordinateur	Mise en place de technologies de production autonomes intelligentes, capables de s'adapter automatiquement à différentes situations (ex : robots)
			X		
	<b>Assistance et collaboration technologique</b>	Collaboration technologie et Homme séparée sans interface commune	Assistance technologique manuelle pour les tâches manuelles type exosquelette, préhenseur...)	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains avec intelligences artificielles et adaptation des mouvements
		X			

<b>CONCEPTI ON</b>	<b>Réalisation des tests sur prototypes</b>	Tests mécaniques et mesure des produits sur pièces physiques	Capacité de réalisation de tests sur prototypes numériques de pièces simples	Prototypage virtuel de sous-systèmes avec simulation de tests	Prototypage virtuel de systèmes complexes avec simulation de tests
		X			
	<b>Représentation/modélisation des pièces et produits</b>	Dessin pièces sur papier	Représentation numérique des produits (2D ou 3D)	Représentations numériques des pièces/produits (2D ou 3D) dans une plateforme collaborative	Utilisation de technologies de visualisation pour représentation dans l'espace de représentations 3D
			X		
	<b>Capacité de conception collective</b>	Le système technologique de l'entreprise ne permet d'impliquer des acteurs que s'ils sont physiquement dans le même lieu	Le système technologique de conception de l'entreprise permet l'échange de fichiers numériques, qui ne sont pas disponibles en ligne	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification à distance, mais pas de manière simultanée par plusieurs utilisateurs	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification des fichiers à distance, même en simultané avec d'autres utilisateurs
			X		
	<b>Technologies dédiées au prototypage</b>	Maquettage (machines manuelles)	Réalisation de prototypes grâce à l'utilisation de machines numériques	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication additive	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication hybride
		X			

<b>CONCEPTION</b>	<b>Virtualisation de pièces physiques</b>	Réalisation de profilage de pièces en 2D	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par contact	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique manuel	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique autonome
		X			
	<b>Acquisition de données utilisateurs pour la conception</b>	Pour obtenir des données d'utilisation, mise en place de tests utilisateurs sans technologies numériques dédiées	Utilisation de supports numériques pour la captation des données lors des tests utilisateurs	Collecte de données d'utilisation directement à partir des produits pour l'amélioration de la conception	Utilisation de Big Data et/ou d'IA pour le traitement et analyse des données pour l'amélioration de la conception
		X			

### e. Détail des niveaux mesurés par pratique et identification des pratiques à renforcer

Les pratiques les plus faibles de chaque axe, qui seront celles indiquées comme devant être améliorées en priorité, sont surlignées en rouge.

Conduite du changement	Implication de la direction	Implication directe	2
		Mise à disposition des ressources	1
	Méthodologie	Communication	1
		Gestion de projet	1

Maturité des processus	Production	Planification de la production	2
		Pilotage opérationnel et contrôle de la production	1
	Logistique	Gestion du stock et des réapprovisionnements	1
		Logistique interne et approvisionnement de la production	2
		Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs	1
	Qualité	Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité	1
		Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité	3
		Pilotage opérationnel de la qualité	2
	Maintenance		2
	Conception	Existence processus	Oui
Pilotage du processus de conception		1	

Maturité technologique	Qualité	Détection de défauts de production	1
		Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité	1
		Procédure de contrôle visuel de la qualité	1
	Conception	Réalisation des tests sur prototypes	1
		Représentation/modélisation des pièces et produits	2
		Capacité de conception collective	2
		Technologies dédiées au prototypage	1
		Virtualisation de pièces physiques	1
		Acquisition de données utilisateurs pour la conception	1
	Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	2
		Suivi des opérations de maintenance	1
		Guidage des opérateurs de maintenance	1
		Formations des opérateurs de maintenance	1
	Logistique	Guidage des opérateurs logistiques	1
		Technologies pour le transport des pièces/produits	1
		Technologies pour la gestion du magasin	2
		Technologies de suivi des pièces et matériaux	2
		Suivi et traitement des données de logistique	2
		Gestion des commandes fournisseurs	1
		Gestion et prévision des commandes clients	2
	Production	Planification de la production	1
		Suivi et traitement des données de production	1
		Guidage des opérateurs de production	1
		Machines du système de production	2
		Assistance et collaboration technologique	1

## Annexe C : Détail des niveaux de maturité et des résultats du troisième cas d'étude

Nous présentons dans cette annexe le détail des réponses et des résultats du troisième cas d'études sur notre prototype fonctionnel de notre outil.

La première partie présente les réponses aux questions ayant permis l'identification de la typologie de production de l'entreprise. Les parties suivantes présente les réponses sur les différentes grilles de maturité de nos trois dimensions. Enfin, nous présentons le détail des niveaux mesurés pour chaque pratique et l'identification des pratiques les plus faibles, qui seront celles mises en avant comme devant être améliorées en priorité.

### a. Identification de la typologie de production de l'entreprise

Votre système de production permet-il la production de nombreux produits différents ?	
Oui	Non
	X

Avez-vous la capacité d'introduire de la personnalisation sans interruption de la production ?	
Oui	Non
	X

Avec ces réponses, la typologie de production identifiée était une production en grandes séries.

## b. Mesure des niveaux de la capacité de conduite du changement

<b>IMPLICATION DE LA DIRECTION</b>	<b>Implication directe</b>	Pas ou peu de support de la direction ; faible présence durant les réunions de l'équipe projet	Un porteur de projet auprès de la direction est nommé, mais est peu impliqué ou pas assez influent pour défendre efficacement le projet ; présence de représentants de la direction aux réunions de projets régulières mais pas systématiques	Un porteur de projet avec une réelle influence au niveau de la direction est nommé ; l'implication de la direction est visible pour toute l'entreprise, à toutes les étapes du projet, même après l'implantation ; présence systématique aux réunions du groupe projet
				X
	<b>Mise à disposition des ressources</b>	Le changement est lancé et des équipes sont impliquées uniquement lorsque les tâches opérationnelles laissent du temps libre ; il y a des problèmes réguliers de ressources (personnelles ou matérielles) ; il est difficile de mettre en place les formations nécessaires pour les équipes	Les tâches opérationnelles rentrent parfois en conflit avec l'avancée du projet ; il y a des problèmes ponctuels de ressources humaines ou matérielles ; des formations sont lancées lorsque les tâches opérationnelles en laissent le temps	Il n'y a aucun problème de ressources humaines ou matérielles sur tout le déroulement des projets de changement ; des ressources spécifiques (en temps et en moyen) sont dédiées à la formation des équipes systématiquement à chaque projet
			X	

<b>METHODOLOGIE</b>	<b>Communication</b>	Peu de personnes dans la structure connaissent l'importance des projets de changement, leur avancement ou leurs impacts réels; leur intérêt n'est pas évident pour la plupart du personnel; La communication est très majoritairement descendant; il n'y a pas de canal formel pour de la communication montante	Les personnes directement concernées sont au courant de l'avancement des projets de transformation, mais pas forcément le reste du personnel; des canaux formels sont toujours en place pour de la communication descendante; des communications montantes peuvent être ponctuellement mis en place	Tout ou presque tout le personnel est au courant des projets de transformation, de leur intérêt et de leurs impacts; des canaux formels sont en permanence en place pour des communications dans les deux sens
			X	
	<b>Gestion de projet</b>	Des techniques de gestion de projet ne sont jamais ou rarement mis en œuvre; pas ou peu de personnes sont formées à ces techniques; il n'y a pas d'équipes claires pour conduire les projets de changement; il n'y a pas de processus ou de tâches clairement établis pour la conduite du changement, l'identification ou la mise en place des formations nécessaires aux équipes concernées par le changement	Une équipe est fixée avec un pilote de projet; le pilote connaît et applique régulièrement des outils de gestion de projets; le processus intègre systématiquement des étapes d'identification et de mise en place des formations nécessaires pour les équipes concernées par le changement	Une méthodologie de gestion de projets est établie maîtrisée et systématiquement appliquée pour tous les projets de transformation; chaque fin de projet est l'occasion de retours d'expériences et d'ajustements, dans une démarche d'amélioration continue
				X

### c. Mesure des niveaux de la maturité des processus

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Les ordres de production sont lancés sans règles claires de priorisation, de manière poussée ; il n'y a pas de capacité de modification de la planification sur un cycle de production déjà entamé	Des règles de priorisation formelles sont définies ; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, permettant une certaine prise en compte des retards reportés	Des règles de priorisation formelles sont définies; les ordres de fabrication sont lancés de manière tirée, et l'avancement est suivi grâce à des indicateurs, permettant des ajustements rapides de la planification	Les ordres de fabrication sont attribués de manière flexible, avec une prise en compte des spécificités des commandes et des caractéristiques des machines de production, afin d'optimiser les temps de fonctionnement et d'offrir une grande flexibilité
				X	
	<b>Pilotage opérationnel et contrôle de la production</b>	La production est réalisée sans réel pilotage, et il n'y a pas d'objectifs formels autre que "produire"	La production est pilotée en suivant des objectifs formels, prenant en compte les capacités de production du système	Des indicateurs permettent le suivi de l'avancement de la production, fournissant les données nécessaires au lancement rapide de plans d'action, suivant une méthodologie maîtrisée	Le système de production est suivi et piloté en temps réel, permettant de lancer les actions de correction dès que c'est utile
					X

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion du stock et des réapprovisionnements</b>	Les commandes de pièces ou de matières premières sont déclenchées si des besoins sont constatés; il n'y a pas de pratiques formalisées ou systématiques pour suivre l'état des stocks	Des niveaux de stocks hauts et bas ont été définis; les stocks sont suivis et les commandes sont lancées lorsque les niveaux bas sont atteints	Des indicateurs pour effectuer le suivi des stocks sont définis et suivis; les prévisions de vente et de production sont intégrées au suivi des stocks pour adapter les commandes	Le système de gestion de l'inventaire met en place des indicateurs pour suivre au plus près la consommation réelle pour optimiser les commandes et les stocks
					X
	<b>Logistique interne et approvisionnement de la production</b>	L'alimentation des lignes de production a uniquement lieu lorsque des besoins sont constatés; Aucun standard n'a été défini pour la préparation à l'approvisionnement	Pour déclencher le réapprovisionnement des lignes de production, des niveaux minimaux ont été définis et mis en place; Les pièces sont mises en départ de ligne très en amont de leur consommation	Les niveaux minimum et maximum sont fixés pour l'approvisionnement des lignes de production; Les besoins de composants sont groupés pour faire des lots d'alimentation de lignes en fonction de la planification	Les niveaux fixés pour l'alimentation des lignes de production sont préparés en fonction de la planification de la production, puis adaptée en direct par rapport à la consommation réelle; Les pièces sont apportées au moment où elles sont nécessaires, suivant les besoins en temps réel
				X	

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs</b>	La communication avec les fournisseurs et les clients est uniquement en place à travers le passage des commandes, avec des relations très descendantes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle pour des sujets simples, comme les retards ou l'avancement des commandes	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de manière bidirectionnelle, des pratiques pour chercher à améliorer le fonctionnement logistique sont en place avec les uns ou les autres	La communication avec les fournisseurs et les clients est établie de façon à permettre une recherche commune d'optimisation du fonctionnement logistique
			X		

<b>MAINTENANCE</b>	La maintenance est mise en place de manière corrective, uniquement en cas de défaillance de machines ou d'équipements	Certaines pratiques de maintenance préventive ont été mises en place, planifiée sur une régularité temporelle ou à la suite de constatation de dégradation des équipements	Une maintenance préventive est mise en place, planifiée grâce aux suivis d'indicateurs machines, à des conditions de déclenchement formalisées, et des contrôles réguliers; certaines tâches basiques d'entretien des machines peuvent parfois être réalisées de manière autonome par les opérateurs de production	Un processus de maintenance prédictive est mise en place, basé sur un suivi d'indicateurs et de paramètres machines permettant la détection à l'avance et le traitement préventif de futures défaillances potentielles; les opérateurs de production sont responsables des tâches d'entretien de routine et sont sensibilisés à l'importance de communiquer sur l'observation de défaillances potentielles
			X	

<b>QUALITE</b>	<b>Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité</b>	La fonction qualité n'est pas clairement définie au sein de l'entreprise, ne renvoie pas à des responsabilités clairement établies; elle est uniquement à la charge du dirigeant	La fonction qualité est définie formellement, et est associée à un ou des responsables et/ou une équipe dédiée, chargés de son application	La fonction qualité est associée à des objectifs, des indicateurs et des mesures clairement définis; certaines tâches simples du processus qualité sont confiées à d'autres personnes que les membres de l'équipe "qualité" (ex: des opérateurs de production)	Tout le personnel est impliqué dans l'application du processus qualité; Le suivi de la qualité est mené à travers tous les processus de l'entreprise
					X
	<b>Pilotage opérationnel de la qualité</b>	Il n'y a pas de gestion formalisée de la qualité; les contrôles qualité de la production ne sont pas conduits de manière systématisés	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; une démarche de contrôle qualité postérieur à la production est systématisé	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production; des méthodes formalisées et maîtrisées permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates	La qualité fait l'objet d'un processus formalisé; des contrôles qualité sont mis en place en parallèle de la production, et permettent la mise en place d'actions palliatives immédiates; des actions de prévention de défauts potentiels peuvent être identifiées et mise en place au préalable, dans une dynamique d'amélioration continue
				X	

QUALITE	<b>Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité</b>	L'application des spécifications des clients et la gestion des retours se fait sur le tas, sans processus formellement défini	Un processus formel a été établi pour la prise en compte des spécifications des clients et pour la gestion des retours	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'améliorations ponctuelles de la production et de son process pour atteindre les exigences clients	Le processus de gestion des exigences intègre un standard pour la prise en compte des exigences clients, capable de proposer des améliorations chiffrées, mesurées, avec des éléments de comparaison; les processus de gestion des exigences et des retours font l'objet d'amélioration continue
				X	

	Présence d'un processus de conception	Oui		Non	
		X			
<b>CONCEPTION</b>	<b>Pilotage du processus de conception</b>	La conception de nouveaux produits ou processus ne fait pas l'objet d'un processus défini	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini et appliqué pour chaque nouveau projet	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive	Un processus de conception de nouveaux produits ou processus est formellement défini, associé à des indicateurs permettant de mener un suivi et de lancer des actions correctives en cas de dérive; des pratiques de gestion des connaissances et de retours d'expérience permettent d'améliorer le processus à chaque projet; Le processus intègre des acteurs d'autres départements de l'entreprise ou extérieurs à l'entreprise durant certaines phases de conception
			X		

#### d. Mesure des niveaux de maturité technologique

Il s'agit des résultats obtenus après avoir pris en compte les remarques de notre interlocuteur, et donc sans prendre en compte les fonctions technologiques « Procédure de contrôle visuel de la qualité » dans l'axe de qualité et « Acquisition de données utilisateurs pour la conception » dans l'axe de conception.

<b>QUALITE</b>	<b>Détection de défauts de production</b>	Détection de défauts de qualité par capteurs mécaniques	Détections de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques, sur pièce à posteriori de la production	Détection de défauts de qualité dans la production par capteurs numériques connectés, en temps réel de la production	Détection de défauts de qualité dans la production avec automatisation des actions de correction et ajustement autonomes des paramètres machines
				X	
	<b>Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité</b>	Traitement "manuel" des données pour le suivi de la qualité	Traitement numérique automatisé des données "qualité" pour le suivi de la qualité importées manuellement	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi de la qualité des processus de production	Importation et traitement numériques des données "qualité" pour le suivi et contrôle de la qualité des processus de production (Big Data) et correction automatisée du processus de suivi
				X	
	<b>Procédure de contrôle visuel de la qualité</b>	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire à rechercher manuellement	contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique non interactif	Contrôle visuel de la qualité via mode opératoire en support numérique connecté interactif	Contrôle visuel numérique de la qualité via mode opératoire en RA

<b>MAINTENANCE</b>	<b>Acquisition et traitement des données pour la maintenance</b>	Acquisition de valeurs techniques de maintenance	Acquisition de données industrielles non structurées transférables pour analyse de la maintenance	Acquisition de données industrielles et structuration pour analyse de la maintenance	Suivi de la santé des machines de l'atelier, apprentissage pour la qualification et la prédiction des pannes
				X	
	<b>Suivi des opérations de maintenance</b>	Relevé manuel des données de maintenance et suivi non informatisé	Suivi informatique des tâches de maintenance (support informatique de GMAO)	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO	Communication automatique des données brutes des machines à entretenir avec le logiciel de GMAO, permettant la détection automatique des besoins et des tâches de maintenance
				X	
	<b>Guidage des opérateurs de maintenance</b>	Modes opératoires non informatisés	Support informatique pour les modes opératoires de maintenance	Support numérique interactifs pour le guidage des tâches manuelles de maintenance	Technologies de visualisation pour le guidage automatisé des tâches manuelles de maintenance
			X		
	<b>Formations des opérateurs de maintenance</b>	Pas de technologies numériques pour la formation des opérateurs de maintenance	Système numérique pour la formation des équipes à la maintenance	Système numérique interactif pour le guidage pour la formation des équipes à la maintenance	Guidage par logiciel de visualisation pour la formation à la maintenance
		X			

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Guidage des opérateurs logistiques</b>	Organisation non informatisée pour la gestion du guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique non connecté	Guidage des opérateurs logistiques pour la préparation de pièces ou commandes avec support numérique connecté	Gestion de la préparation des commandes piloté automatiquement et soutien à la préparation des pièces et commandes par réalité augmentée	
				X		
	<b>Technologies pour le transport des pièces/produits</b>	Utilisation de technologies non numériques (fenwick, transpalette,...)			Transports internes autonomes dans leurs déplacements, alimentés manuellement	Automatisation des transports internes, de l'alimentation des lignes et de la manutention
					X	
	<b>Technologies pour la gestion du magasin</b>	Pas de technologies numériques pour la gestion du magasin	Utilisation de technologies numériques pour la gestion du magasin, mais manutention manuelle des pièces et matériaux		Systèmes de rangements autonomes du magasin, avec échanges manuels entre ceux-ci et les technologies de transports	Systèmes de rangements autonomes du magasin capables d'interagir automatiquement avec les technologies de transports
					X	
	<b>Technologies de suivi des pièces et matériaux</b>	Pas de technologies numériques dédiées au suivi des pièces et matériaux	Identification et suivi d'éléments par recherche de référence sur support informatique, mise à jour manuelle des données		Identification et suivi des éléments par scan manuel et mise à jour automatique des données	Identification et suivi autonome des éléments par scan automatique et mise à jour automatique des données
					X	

<b>LOGISTIQUE</b>	<b>Suivi et traitement des données de logistique</b>	Collecte et suivi manuels des données de logistique	Réception et intégration des données de logistique, incluant le plan des stockages de matériaux, sur support numérique	Collecte automatique des données et simulation des flux de matériaux	Simulation des flux de matériaux en temps réel et guidage automatique pour rangement et allocation des matériaux
					X
	<b>Gestion des commandes fournisseurs</b>	Planification manuelle des commandes	Proposition automatique de planification de l'expédition des commandes en fonction du niveau de stock	Proposition et transmission automatique de planification de l'expédition des commandes (système d'envoi automatique des commandes après validation)	Proposition et transmission automatique des planifications de l'expédition des commandes, avec mise à jour en temps réel
				X	
	<b>Gestion et prévision des commandes clients</b>	Gestion manuelle des commandes clients ; pas de pratiques de prévision des commandes clients	Evaluation et prévision de la demande par traitement manuel de données numériques	Evaluation et prévisions avancées de la demande	Evaluation prédictive de la demande, mise à jour en temps réel
				X	

<b>PRODUCTION</b>	<b>Planification de la production</b>	Planification manuelle sur support non informatisé	Planification numérique non automatisé de la production ou planification numérique automatisée sans intégration des données de production	Planification numérique de la production automatisée avec prise en compte des données de statut de la production	Planification numérique automatisée de la production intégrant les données en temps du système de production pour proposer des corrections en cas de détection de dérives
					X
	<b>Suivi et traitement des données de production</b>	Mesures par capteurs et collecte des données manuellement ou via les interfaces des machines de production	Collecte et centralisation numériques des données du système de production	Collecte et centralisation numérique des données du système de production en temps réel	Collecte et traitement automatisé des données des processus en temps réel, pouvant permettre la mise en place de rétroaction
				X	
	<b>Guidage des opérateurs de production</b>	Utilisation de modes opératoires non informatiques pour le guidage des tâches	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires sur interfaces numériques	Guidage pour les tâches manuelles des opérateurs avec modes opératoires avec suivi autonome des tâches	Guidage automatisé visuel pour les tâches manuelles des opérateurs
				X	

<b>PRODUCTION</b>	<b>Machines du système de production</b>	Pas d'automatisation ; Machines de production traditionnelles non numériques	Automatisation de tâches individuelles de production ; Machines à commandes numériques, pilotées sur pupitre	Automatisation de suites de tâches importantes des processus de production (type changement d'outils, lignes automatisées, ...) ; Machines à commande numérique, avec Fabrication Assistée par Ordinateur	Mise en place de technologies de production autonomes intelligentes, capables de s'adapter automatiquement à différentes situations (ex : robots)
				X	
	<b>Assistance et collaboration technologique</b>	Collaboration technologie et Homme séparée sans interface commune	Assistance technologique manuelle pour les tâches manuelles type exosquelette, préhenseur...)	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains	Assistance technologique automatique, Robots pour opération collaboratives avec les humains avec intelligences artificielles et adaptation des mouvements
				X	

<b>CONCEPTI ON</b>	<b>Réalisation des tests sur prototypes</b>	Tests mécaniques et mesure des produits sur pièces physiques	Capacité de réalisation de tests sur prototypes numériques de pièces simples	Prototypage virtuel de sous-systèmes avec simulation de tests	Prototypage virtuel de systèmes complexes avec simulation de tests
				X	
	<b>Représentation/modélisation des pièces et produits</b>	Dessin pièces sur papier	Représentation numérique des produits (2D ou 3D)	Représentations numériques des pièces/produits (2D ou 3D) dans une plateforme collaborative	Utilisation de technologies de visualisation pour représentation dans l'espace de représentations 3D
				X	
	<b>Capacité de conception collective</b>	Le système technologique de l'entreprise ne permet d'impliquer des acteurs que s'ils sont physiquement dans le même lieu	Le système technologique de conception de l'entreprise permet l'échange de fichiers numériques, qui ne sont pas disponibles en ligne	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification à distance, mais pas de manière simultanée par plusieurs utilisateurs	Le système technologique de l'entreprise inclut la disponibilité en ligne des fichiers de conception, permettant la consultation et la modification des fichiers à distance, même en simultané avec d'autres utilisateurs
					X
	<b>Technologies dédiées au prototypage</b>	Maquettage (machines manuelles)	Réalisation de prototypes grâce à l'utilisation de machines numériques	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication additive	Prototypage rapide grâce à l'utilisation de fabrication hybride
			X		

<b>CONCEPTION</b>	<b>Virtualisation de pièces physiques</b>	Réalisation de profilage de pièces en 2D	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par contact	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique manuel	Réalisation de modèles numériques de pièces en 3D par scan optique autonome
			X		
	<b>Acquisition de données utilisateurs pour la conception</b>	Pour obtenir des données d'utilisation, mise en place de tests utilisateurs sans technologies numériques dédiées	Utilisation de supports numériques pour la captation des données lors des tests utilisateurs	Collecte de données d'utilisation directement à partir des produits pour l'amélioration de la conception	Utilisation de Big Data et/ou d'IA pour le traitement et analyse des données pour l'amélioration de la conception

### e. Détail des niveaux mesurés par pratique et identification des pratiques à renforcer

Il s'agit des résultats obtenus après avoir pris en compte les remarques de notre interlocuteur, et donc sans prendre en compte les fonctions technologiques « Procédure de contrôle visuel de la qualité » dans l'axe de qualité et « Acquisition de données utilisateurs pour la conception » dans l'axe de conception. Les pratiques les plus faibles de chaque axe, qui seront celles indiquées comme devant être améliorées en priorité, sont surlignées en rouge.

Conduite du changement	Implication de la direction	Implication directe	3
		Mise à disposition des ressources	2
	Méthodologie	Communication	2
		Gestion de projet	3

Maturité des processus	Production	Planification de la production	3
		Pilotage opérationnel et contrôle de la production	4
	Logistique	Gestion du stock et des réapprovisionnements	4
		Logistique interne et approvisionnement de la production	3
		Gestion des relations avec les clients et les fournisseurs	2
	Qualité	Implication des équipes et du personnel dans le processus qualité	4
		Prise en compte des exigences et des attentes clients dans le processus qualité	3
		Pilotage opérationnel de la qualité	3
	Maintenance		3
	Conception	Existence processus	Oui
Pilotage du processus de conception		2	

Maturité technologique	Qualité	Détection de défauts de production	3	
		Importation et traitement des données pour le suivi de la qualité	3	
		Procédure de contrôle visuel de la qualité	X	
	<b> </b>			
	Conception	Réalisation des tests sur prototypes	3	
		Représentation/modélisation des pièces et produits	3	
		Capacité de conception collective	4	
		Technologies dédiées au prototypage	2	
		Virtualisation de pièces physiques	2	
		Acquisition de données utilisateurs pour la conception	X	
	<b> </b>			
	Maintenance	Acquisition et traitement des données pour la maintenance	3	
		Suivi des opérations de maintenance	3	
		Guidage des opérateurs de maintenance	2	
		Formations des opérateurs de maintenance	1	
	<b> </b>			
	Logistique	Guidage des opérateurs logistiques	3	
		Technologies pour le transport des pièces/produits	3	
		Technologies pour la gestion du magasin	3	
		Technologies de suivi des pièces et matériaux	4	
		Suivi et traitement des données de logistique	4	
		Gestion des commandes fournisseurs	3	
		Gestion et prévision des commandes clients	3	
	<b> </b>			
	Production	Planification de la production	4	
		Suivi et traitement des données de production	3	
		Guidage des opérateurs de production	3	
Machines du système de production		3		
Assistance et collaboration technologique		3		