



**HAL**  
open science

# Contribution à la formalisation d'un processus PDP agile dans le cadre de l'industrie 4.0

Estefania Tobon Valencia

## ► To cite this version:

Estefania Tobon Valencia. Contribution à la formalisation d'un processus PDP agile dans le cadre de l'industrie 4.0. Méthodes et statistiques. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE030 . tel-02968936

**HAL Id: tel-02968936**

**<https://theses.hal.science/tel-02968936v1>**

Submitted on 16 Oct 2020

**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.

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**  
**[LAMIH UMR CNRS 8201 – Campus de Paris]**

# THÈSE

présentée par : **Estefania TOBON VALENCIA**

soutenue le : **08 septembre 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie industriel**

**Contribution à la formalisation d'un processus PDP  
agile dans le cadre de l'industrie 4.0**

**THÈSE dirigée par :**  
**[Professeur LAMOURI Samir]**

**et co-encadrée par :**  
**[Professeur PELLERIN Robert]**

**Jury**

**Mme Zohra CHERFI-BOULANGER**, Professeure, UTC  
**Mme Hind BRIL-EL HAOUZI**, Professeure, UL  
**M. Sébastien GAMACHE**, Professeur, UQTR, Trois Rivières  
**M. Samir LAMOURI**, Professeur, Arts et Métiers  
**M. Alexandre MOEUF**, Docteur, Directeur Supply Chain, Exxelia  
**M. Seyed- Esmail MOUSSAVI**, Docteur, UCP  
**M. Robert PELLERIN**, Professeur, Polytechnique Montréal

Présidente  
Rapporteuse  
Rapporteur  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur

**T  
H  
È  
S  
E**



À mes parents, à mon trésor et à mon amour

## Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Samir LAMOURI, et à mon codirecteur, M. Robert PELLERIN pour leur accompagnement, leur soutien, leurs conseils et l'aide qu'ils m'ont apportés tout au long du projet. Leurs questionnements m'ont toujours permis de progresser au-delà de mes objectifs. J'adresse toute ma gratitude à M. Samir LAMOURI pour m'avoir aidée à retrouver la force dans mon cœur après le décès de mon père, de m'avoir incitée à retrouver le courage et la ténacité nécessaires pour finaliser mon projet doctoral.

Je souhaite remercier également les membres de mon jury de thèse, tout d'abord, Mme Zohra CHERFI-BOULANGER, professeure de l'Université de Technologie Compiègne, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse, Mme Hind BRIL-EL HAOUZI, professeure à l'Université de Lorraine et M. Sébastien GAMACHE, professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail de recherche.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à notre partenaire industriel : le groupe Exxelia et tout particulièrement à M. Alexandre MOEUF, Responsable Supply Chain et encadrant industriel, pour son accueil au sein du groupe et ses conseils, sa bienveillance à l'égard de mon projet de recherche. Mon sujet de thèse a évolué et il a accepté avec audace et confiance de me soutenir. Je souhaite également remercier les chefs planificateurs, les responsables de production, les responsables des approvisionnements, les responsables d'ordonnancement, les responsables commerciaux, les responsables méthodes et bureau d'études, pour leur participation à l'étude Delphi-Régnier.

Je tiens à remercier AMVALOR, notre partenaire académique qui a cru dans notre projet de recherche.

Je souhaite remercier M. Seyed-Esmaeil MOUSSAVI pour son aide dans la conception des approches d'optimisation. Je tiens à remercier également à M. Frédérique ROSIN, M. Laurent JOBLOT, M. Juan Pablo USUGA CADAVID pour leur aide lors de l'approche du PDP 4.0.

J'aimerais également remercier les membres du laboratoire LAMIH aux Arts et Métiers et plus particulièrement Mme Léa SATTLER et M. Juan Pablo USUGA CADAVID pour leur amitié et leur ouverture à partager leurs connaissances scientifiques.

Je remercie du fond du cœur mes parents pour leur soutien dans la réalisation de mon projet professionnel à l'étranger. Merci de m'avoir accompagnée à distance avec amour, confiance et compréhension. Le partage de leurs expériences et de leurs savoir-faire m'a permis de retrouver la lumière dans les moments difficiles. Un grand merci à ma mère pour m'avoir motivée à continuer ce projet malgré le décès de mon père. Merci de m'avoir incitée à poursuivre mon rêve. Je remercie également ma petite sœur, mon trésor, merci de m'avoir apporté de la lumière, de l'énergie et de la joie quand il l'a fallu. Je la remercie pour son soutien à mes projets professionnels et personnels. Ses questionnements m'ont toujours motivée à rendre compréhensibles les résultats de ma recherche.

Enfin, j'aimerais remercier mon compagnon de vie pour son soutien inconditionnel, ses idées, la relecture attentive de mon travail et sa présence emplie de compréhension et de tranquillité. Merci de m'avoir soutenue avec patience et amour dans les moments difficiles que j'ai vécu pendant ces trois ans. Il m'aurait été impossible de compléter ce projet sans lui.

## Résumé

Les PME (Petites et Moyennes Entreprises) manufacturières, représentants majeurs de l'industrie mondiale, font face aujourd'hui à de fortes pressions pour répondre dans des délais toujours plus courts aux besoins particuliers des clients avec des prix compétitifs. Dans cet environnement de concurrence accrue, la transformation de processus de planification de la production par l'exploitation des technologies 4.0 peut apporter des réponses à ces défis. Cependant, considérant le nombre des technologies proposées à l'ère du numérique, il n'est pas simple pour les PME de sélectionner les groupes technologiques les plus adaptés à leur contexte industriel et organisationnel ainsi que les activités sensibles d'être améliorées par le numérique. La planification d'un projet de transformation de processus par le numérique requiert une définition de la portée du 4.0 ainsi que des objectifs de performance à atteindre avec le projet. Toutefois, notre revue de la littérature montre que les PME manquent de modèles pour aborder la transformation numérique dans les processus de planification.

En vue de cette problématique, cette thèse doctorale propose une approche de planification de la production à moyen terme dans le cadre de l'industrie 4.0, centré sur le processus PDP (Programme Directeur de Production) pour les PME manufacturières. Afin de répondre à nos objectifs, nous avons d'abord conduit une étude prospective pour préciser le besoin industriel associé au PDP au sein d'un groupe de PME manufacturières. Cette étude a montré que les axes de transformation principaux se concentraient autour du processus et des outils de support pour la prise des décisions. Dans le but de rendre agile le processus PDP nous présentons une méthodologie de sélection des activités sensibles à être faites d'une nouvelle façon à partir de deux leviers d'amélioration, la surveillance et l'optimisation. Sur cette base nous proposons l'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le PDP. Quant aux outils de support pour la prise des décisions, nous proposons deux approches d'optimisation pour le PDP adaptées à des contextes industriels d'assemblage sur commande, avec différentes lignes d'assemblage, divers goulets, plusieurs articles directeurs et fabrication principalement artisanale. Nous présentons également l'intégration de ces approches d'optimisation dans le processus PDP.

Mots-clés : Planification de la production, Programme Directeur de Production (PDP), Industrie 4.0, Agilité, PME.

## Résumé en anglais

Manufacturing SMEs (Small and Medium-sized Enterprises), major actors of the global industry, are subjected to strong pressure from the market to respond in shorter delays to customized needs with competitive prices. The evolution of production planning activities through the 4.0 technologies can provide answers for facing these challenges. However, considering the large number of industry 4.0 technologies, it is not easy for SMEs to select the most adequate technologies for their industrial and organizational context and the most adequate activities that could enhance a digital improvement. Planning a digital transformation project requires the definition of the 4.0 scope as well as a clear vision of the performance objectives to be achieved. Nevertheless, our review of the scientific literature shows that SMEs lack models for carrying digital transformation in planning activities.

This thesis proposes a 4.0 production planning approach, focused on the Master Production Schedule (MPS), for manufacturing SMEs. In order to reach our research goal, we conducted a prospective study to specify the industrial need of the MPS process within a group of manufacturing SMEs. This study revealed that the main levers of the transformation concerned the process and the tools for supporting decision-making. Regarding the process, we present a methodology for selecting the activities to be done in a new way based on two improvement levers, monitoring and optimization. On this basis, we propose the integration of the 4.0 technologies in the MPS. As for decision support tools, we propose two optimization approaches for the MPS in the context of SME with an assemble-to-order (ATO) strategy, multiple assembly lines, several bottlenecks, diverse master items and a mainly artisanal production process. We also present the integration of these optimization approaches in the MPS activities.

Key words: Production Planning, MPS (Master Production Schedule), Industry 4.0, Agility, SME.

# Table des matières

Remerciements .....	4
Résumé .....	6
Résumé en anglais .....	7
Liste des tableaux .....	12
Liste des figures .....	14
Liste de sigles et abréviations.....	16
Liste des annexes.....	18
Introduction .....	19
Chapitre 1 . État de l'Art : Approches de planification de la production 4.0.....	25
1.1. Introduction .....	25
1.2. Cadre d'analyse .....	27
1.2.1. Caractérisation générale de l'approche de planification de la production .....	28
1.2.2. Agilité.....	29
1.2.3. Portée de l'approche de planification de la production.....	29
1.2.4. Moyens de l'approche de planification de la production .....	30
1.3. Stratégie de Revue de la Littérature .....	31
1.4. Analyse de la littérature et résultats .....	36
1.4.1. Caractérisation de l'approche de planification de la production.....	37
1.4.2. Agilité.....	44
1.4.3. Portée de l'approche de planification de production.....	50
1.4.4. Moyens employés par les approches de planification de la production .....	54
1.5. Synthèse de l'État de l'Art .....	64
1.6. Conclusions .....	68
Chapitre 2 : Méthodologie de Recherche .....	70
2.1. Introduction .....	70
2.2. Questions de recherche et objectifs .....	70
2.3. Ancrage industriel .....	71
2.4. Plan de mise en œuvre.....	72
2.5. Conclusion.....	74
Chapitre 3 : Étude Delphi Régnier .....	76
3.1. Introduction .....	76
3.2. Technique Delphi .....	77

3.3.	Abaques de Régnier .....	78
3.4.	Organisation de l'étude .....	80
3.4.1.	Sélection des experts .....	80
3.4.2.	Détermination de la taille du panel d'experts.....	81
3.4.3.	Création du questionnaire initial .....	81
3.4.4.	Évolution du questionnaire.....	86
3.5.	Synthèse de l'étude.....	86
3.5.1.	Caractéristiques du processus PDP .....	87
3.5.2.	Prise de décisions PDP.....	94
3.5.3.	Caractéristiques du marché .....	95
3.5.4.	Retard de commandes clients.....	95
3.6.	Conclusion de l'étude.....	96
3.6.1.	Niveau de capacité du processus PDP.....	96
3.6.2.	Difficultés.....	97
3.6.3.	Opportunités d'amélioration .....	99
3.6.4.	Limites.....	101
3.6.5.	Perspectives.....	101
Chapitre 4 : Modélisation processus PDP 4.0 - BPMN .....		103
4.1.	Introduction .....	103
4.2.	Planification de la production et PDP .....	103
4.3.	Modélisation BPMN 2.0 .....	106
4.4.	Processus PDP actuel (T0) .....	109
4.4.1.	Sous-processus 1 : Planifier capacité et approvisionnements .....	109
4.4.2.	Sous-processus 2 : Ajuster PDP après CBN .....	113
4.4.3.	Constats processus PDP actuel.....	114
4.5.	Processus PDP mature (T1).....	119
4.5.1.	Sous – processus 1 : Définition des paramètres généraux PDP.....	120
4.5.2.	Sous – processus 2 : Planification de la demande.....	122
4.5.3.	Sous - processus 3 : Planification-gestion de la capacité et des approvisionnements.....	123
4.5.4.	Sous - processus 4 : Réunion PDP .....	126
4.5.5.	Sous – processus 5 : Gestion de la capacité suite au calcul de besoins nets ..	127
4.5.6.	Identification tâches modèles « T0 » dans modèle « T1 ».....	135
4.6.	PDP Tn ou PDP 4.0.....	136

4.6.1.	Synthèse Atelier PDP 4.0 .....	136
4.6.2.	Discussion des résultats Tn .....	151
4.7.	Conclusion.....	153
Chapitre 5 : Outil optimisation PDP -approche de résolution exacte .....		157
5.1.	Introduction .....	157
5.2.	Revue de la littérature .....	159
5.2.1.	Problème de planification, approche de modélisation approche d'optimisation et outil d'optimisation .....	162
5.2.2.	Type de demande, extensions de la demande, rapport charge-capacité.....	163
5.2.3.	Fonction objectif et validation.....	163
5.2.4.	PDP- dans des lignes de production, avec plusieurs références de produits finis et considération de temps de réglage.....	164
5.2.5.	PDP- avec machines égales, plusieurs références de produit fini et considération des temps de réglage .....	165
5.2.6.	PDP- plusieurs références produit fini, sans considérer les processus de productions .....	165
5.2.7.	PDP- dans de lignes de production, plusieurs références de produit fini sans considérer les temps de réglage.....	165
5.2.8.	PDP-machines parallèles, plusieurs références de produit fini sans considérer temps de réglage.....	167
5.2.9.	PDP- une seule référence de produit fini sans considérer le temps de réglage	167
5.2.10.	Le modèle proposé face aux modèles existants .....	168
5.3.	Description du problème et méthodologie .....	172
5.3.1.	Hypothèses .....	174
5.4.	Modèle Mathématique.....	176
5.4.1.	Indices .....	177
5.4.2.	Paramètres .....	177
5.4.3.	Variables.....	178
5.4.4.	Fonction Objectif.....	179
5.4.5.	Contraintes .....	179
5.5.	Résultats .....	183
5.5.1.	Résultats Expérimentaux.....	185
5.5.2.	Résultats et temps de calcul .....	188

5.5.3. Autres résultats PDP.....	190
5.6. Conclusion.....	193
Chapitre 6 : Outil optimisation PDP- approche de résolution heuristique.....	195
6.1. Introduction.....	195
6.2. Revue de la littérature.....	196
6.3. Approche de résolution heuristique PDP.....	202
6.3.1. Description du problème.....	202
6.3.2. Etapes de l'algorithme.....	203
6.3.3. Tests - Plan d'expériences.....	207
6.4. Résultats.....	207
6.4.1. Retard.....	208
6.4.2. Temps de calcul.....	214
6.4.3. Utilisation de la capacité.....	215
6.5. Conclusion.....	218
Conclusion.....	221
Bibliographie.....	227
Annexes.....	238

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Sélection de références .....	34
Tableau 2 : Répartition des articles par source .....	36
Tableau 3 : Caractérisation des approches de planification de la production .....	42
Tableau 4 : Classification de références par dimension d'agilité – Partie 1 .....	48
Tableau 5 : Classification de références par objectif d'agilité – Partie 2.....	49
Tableau 6 : Classification des approches par taille d'entreprise - Partie 1 .....	51
Tableau 7 : Classification des approches par taille d'entreprise - Partie 2 .....	52
Tableau 8 : Classification des approches par moyens – Partie 1 .....	61
Tableau 9 : Classification des approches par moyens – Partie 2 .....	62
Tableau 10 : Éléments graphiques utilisés .....	108
Tableau 11 : Relation tâches modèles PDP actuel (T0) et PDP mature (T1).....	135
Tableau 12 : Références analysées et identification.....	160
Tableau 13 : Comparaison du modèle proposé avec les modèles existants – Partie 1.....	170
Tableau 14 : Comparaison du modèle proposé avec les modèles existants – Partie 2 .....	171
Tableau 15 : Macro-gammes par macro-famille .....	173
Tableau 16 : Plus long délai cumulé par macro-famille de produits.....	174
Tableau 17 : Classification des goulets par type et délai de fabrication .....	176
Tableau 18 Valeur de paramètres par test .....	184
Tableau 19 : Réduction du retard en nombre de semaines ouvrables et nombre de commandes .....	186
Tableau 20 : Comparaison dates d'expédition demandée, proposée par le modèle et réelle-test 31.....	187
Tableau 21 : Temps total de calcul par test.....	188
Tableau 22 : Inventaire produit fini (unités) test 31 .....	191
Tableau 23 : Inventaire en-cours test 31 .....	191
Tableau 24 : Capacité utilisée test 31 .....	192
Tableau 25 : Valeur de paramètres par test .....	207
Tableau 26 : Comparaison retard PDP réel, PDP exacte et PDP heuristique .....	208
Tableau 27 : Comparaison retard PDP réel versus heuristique .....	209
Tableau 28 : Plan de production proposé par l'heuristique et comparaison dates d'expédition modèle versus demandée test 37- commandes 1-90 .....	210

Tableau 29 : Plan de production proposé par l’heuristique et comparaison dates d’expédition modèle versus demandée test 37- commandes 91-194 .....	211
Tableau 30 : Plan de production proposé par l’heuristique et comparaison dates d’expédition modèle versus demandée test 37- commandes 195-298 .....	212
Tableau 31 : Temps de calcul par test .....	214
Tableau 32 : Analyse de charges globales test 11- 40 commandes à planifier .....	215
Tableau 33 : Analyse de charges globales test 22- 150 commandes à planifier .....	216
Tableau 34 : Analyse de charges globales test 37- 298 commandes à planifier – Partie 1....	217
Tableau 35 : Analyse de charges globales test 37- 298 commandes à planifier – Partie 2....	217

## Liste des figures

Figure 1 : Nombre de publications par an « Planification de la production et groupes technologiques 4.0 ».....	26
Figure 2 : Les dix premiers pays par nombre de publications depuis 2011- Planification de la production et Groupes technologiques 4.0.....	27
Figure 3 : Méthodologie de Recherche .....	33
Figure 4 : Sélection des six groupes technologiques 4.0 - Partie 1 .....	35
Figure 5 : Sélection des six groupes technologiques 4.0 - Partie 2.....	35
Figure 6 : Distribution des approches par activité de planification de la production.....	37
Figure 7 : Distribution des approches par horizon de planification .....	43
Figure 8 : Distribution des approches par dimension d'agilité .....	45
Figure 9 : Distribution des approches par taille d'entreprise .....	51
Figure 10 : Distribution des approches par groupe technologique 4.0.....	54
Figure 11 : Distribution des approches par méthode de solution.....	58
Figure 12 : Plan de mise en œuvre thèse.....	74
Figure 13 : Activités de planification de la production et relation avec l'horizon de planification et la gestion des données .....	105
Figure 14 : Processus PDP T0.....	116
Figure 15 : Planifier la capacité et les approvisionnements T0.....	117
Figure 16 : Ajuster le PDP après le CBN (T0).....	118
Figure 17 : Processus PDP T1 .....	129
Figure 18 : Définition des paramètres généraux PDP (T1).....	130
Figure 19 : Planifier la demande (T1) .....	131
Figure 20 : Planifier la capacité et les approvisionnements (T1).....	132
Figure 21 : Réunion PDP (T1) .....	133
Figure 22 : Ajuster PDP après CBN.....	134
Figure 23 : Processus PDP Tn.....	145
Figure 24 : Définition paramètres généraux PDP (Tn) .....	146
Figure 25 : Planifier la demande (Tn) .....	147
Figure 26 : Planifier la capacité et les approvisionnements (Tn).....	148
Figure 27 : Réunion PDP (Tn) .....	149
Figure 28 : Ajuster PDP après CBN (Tn) .....	150
Figure 29 : Représentation du processus de production.....	173

Figure 30 : Variation de la fonction objectif par rapport au nombre total de commandes ....	185
Figure 31 : Temps de calcul en fonction de la quantité totale commandée .....	189
Figure 32 : Temps de calcul en fonction du nombre total de commandes.....	189
Figure 33 : Temps de calcul en fonction de la longueur de l'horizon de planification.....	190

## Liste de sigles et abréviations

ATO : Assemble-To-Order. Assemblage sur commande

BE: Bureau d'Études

BI : Business Intelligence. Informatique décisionnelle

BPMN : Business Process Modeling Notation

CAO: Computer Aided Design. Conception assisté par ordinateur

CBN : Calcul de besoins nets

CO : Capacity Optimization. Optimisation de l'utilisation de la capacité

CONWIP : Constant Work in Process. Niveau constant d'en-cours

CPS : Systèmes cyberphysiques

CSL : Customer Service Level. L'amélioration du niveau de service envers les clients

DR : Disponibilité de ressources

EDD : Earliest Due Date. Date d'échéance la plus proche

ERP : Enterprise Resource Planning. Progiciel de gestion intégrée

ETO : Engineering-To-Order. Ingénierie sur commande

FIFO : First in First Out. Premier arrivé premier servi

IA : Intelligence artificielle

IdO : Internet des objets

ILC : Inventory Level and Costs. L'optimisation du niveau et des coûts d'inventaires

IoT : Internet of Things. Internet des Objets

LT : Lead Time. Délai

MES : Manufacturing Execution System

MILP: Mixed Integer Linear Programming. Programmation linéaire mixte à nombre entiers

MPS : Master Production Schedule. Programme Directeur de Production

MTO : Make-To-Order. Fabrication sur commande

ND : Niveaux de demande

NS : Niveaux de stock

O : Opérationnel, horizon de planification court terme

PA : Planification Agrégée

PAC : Pilotage de l'Atelier

PDP : Programme Directeur de Production

PHP : Planification Hiérarchisée de la Production

PIC : Plan industriel Commercial

PLNE : Programmation Linéaire en Nombres Entières

PME : Petites et Moyennes Entreprises

RCCP : Rough Cut Capacity Planning. Analyse de charges globales

RN : Ressources nécessaires

S : Stratégique, horizon de planification long terme

SaaS : Software as a Service

SME : Small and Medium Size Enterprises. Petites et Moyennes Entreprises

T : Tactique, horizon de planification moyen terme

TPC : Total Production Cost. L'optimisation du coût total de production

## Liste des annexes

Annexe 1 Questionnaire Premier Tour.....	239
Annexe 2 Synthèse Premier Tour.....	242
Annexe 3 Matrices des résultats Premier Tour .....	260
Annexe 4 Questionnaire Second Tour .....	265
Annexe 5 Synthèse Second Tour .....	269
Annexe 6 Matrices de résultats Second Tour.....	285

# Introduction

L'environnement industriel fait l'objet de multiples pressions qui affectent le processus de production. Une concurrence accrue, une demande avec une forte variabilité, des coûts de main-d'œuvre en hausse et une personnalisation de masse de la demande caractérisent cet environnement. Dans ces conditions les entreprises manufacturières cherchent en plus de la productivité et la standardisation, qui avaient été les piliers des révolutions industrielles précédentes, à rendre agiles leurs processus et générer de la valeur ajoutée à partir de la donnée.

Cette nouvelle révolution, dénommée « Industrie 4.0 » en 2011 à la foire de Hanovre, rassemble des technologies qui permettent de récupérer, stocker, communiquer et exploiter des données. Les systèmes cyberphysiques, l'internet des objets, l'infonuagique, les sciences des données, la cybersécurité, les robots/machines autonomes, la réalité virtuelle, les systèmes de simulation, les technologies de communication entre machines et l'intelligence artificielle, ont été identifiés comme les groupes technologiques de cette révolution (CEFRIO, 2016). À l'aide de ces technologies, les entreprises peuvent récupérer des données internes et externes en temps réel pour adapter la prise de décisions aux contraintes du moment et assurer la satisfaction de la demande client.

Acteurs majeurs de l'industrie mondiale, les PME (Petites et Moyennes Entreprises) représentent plus de 90 % des entreprises dans le monde (ISO, 2015). En France, la Loi de Modernisation de l'Économie du 4 août 2008<sup>1</sup> définit les PME comme des entreprises ayant un maximum de 250 salariés et un chiffre d'affaires annuel inférieur à 50 millions d'euros. Il y a un total de 148 000 PME en France. Elles génèrent un chiffre d'affaires de 845 milliards d'euros et emploient 798 000 salariées, dont 94 % d'emplois détenus par les PME manufacturières (Insee, 2019). Nos travaux de recherche se centrent sur les PME manufacturières.

L'exploitation des groupes technologiques de l'industrie 4.0 dans les PME manufacturières vise différents objectifs. Flexibiliser la prise des décisions, réduire les coûts, améliorer la productivité, être plus réactif, adapter l'offre aux nouveaux besoins clients sont quelques exemples d'objectifs que les PME cherchent à atteindre avec le passage au numérique (CEFRIO (2016), Raymond (2005)).

---

<sup>1</sup> Décret d'application N° 2008-1354, article 51

Ce passage au numérique présente plusieurs défis pour les PME. Le manque de compétences techniques, analytiques et numériques, l'alignement du projet de transformation avec la stratégie et le besoin de l'entreprise et l'engagement des employés avec le projet de transformation sont les défis majeurs lors de l'adoption des initiatives 4.0 au sein des PME (Moeuf, et al., 2019). Les PME ont en conséquence besoin de guides leur permettant de savoir comment intégrer des groupes technologiques au processus métier.

Les processus de planification de la production ont toujours eu comme objectif principal de trouver un équilibre entre les exigences du marché et l'utilisation optimale des ressources disponibles. Dans le cadre de la quatrième révolution industrielle, ces processus pourraient être transformés à travers l'intégration des technologies 4.0. Les travaux de recherche de cette thèse se positionnent dans le champ d'exploitation des groupes technologiques 4.0 dans les processus de planification de la production.

Ce projet de recherche s'est déroulé sur une période de trois ans dans le cadre d'un partenariat académique (AMVALOR) et industriel (Exxelia). Le groupe Exxelia rassemble 13 PME dédiées à la conception et la fabrication de solutions électroniques et électromagnétiques. Parmi les 13 sites de production 6 sont localisés en France. Les capteurs de position, les collecteurs tournants, les codeurs, les potentiomètres, les filtres, les films, les pièces de mécanique de précision sont quelques produits intégrant le portefeuille de produits de ce groupe.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans une démarche d'amélioration des processus de notre partenaire industriel. Le passage à un ERP commun au groupe et l'amélioration des pratiques de planification sont au cœur de cette démarche. L'objectif principal étant d'améliorer le taux de satisfaction client, Exxelia cherche à maximiser le nombre de commandes livrées à temps et à minimiser les retards de livraison.

Dans ce contexte, ce document présente les résultats d'un projet de recherche visant à proposer une approche de planification de la production à moyen terme pour les PME manufacturières à l'ère de la quatrième révolution industrielle.

Ce manuscrit comporte six chapitres :

- Chapitre 1 : Approches de planification de la production 4.0

Dans ce chapitre nous décrivons l'état de la recherche concernant les approches de planification de la production dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Nous présentons un cadre d'analyse structuré autour des activités de planification de la production, les horizons de planification, les dimensions de l'agilité, la portée de l'approche, les groupes technologiques 4.0 et les approches de résolution. Après avoir expliqué notre stratégie de revue de la littérature, nous exposons les alternatives d'intégration des technologies 4.0 aux activités de planification de la production pour rendre agiles ces processus. Enfin, nous détaillons les lacunes de recherche identifiées dans l'état de l'art et nous précisons notre objectif de recherche.

- Chapitre 2 : Méthodologie de recherche

Nous présentons en début de chapitre notre question de recherche et les objectifs que nous avons proposés pour y répondre. Dans la deuxième section, nous décrivons l'ancrage industriel de ces travaux de recherche. Enfin, nous exposons le plan que nous avons défini pour atteindre les objectifs de ce projet de recherche.

- Chapitre 3 : Étude Delphi - Régnier

La revue de la littérature nous a permis de constater que peu d'études portent sur l'intégration des technologies 4.0 sur les processus de planification de la production dans les PME. En outre, cette revue a montré que très peu des recherches se sont concentrées sur l'activité de planification à moyen terme. Ces constats étaient en relation avec la problématique de notre partenaire industriel qui cherchait à améliorer le processus PDP (Programme Directeur de Production). Pour identifier les difficultés et opportunités d'amélioration du processus PDP de notre partenaire industriel, il était nécessaire de récupérer des informations terrain. Nous avons sélectionné un groupe d'intervenants du PDP au sein de l'entreprise avec lequel nous avons conduit une étude Delphi-Régnier dans le but de caractériser le besoin industriel. Nous avons ainsi identifié les difficultés du PDP en matière d'outils informatiques, de systèmes d'information, de données et d'activités de prise de décisions. Enfin, nous avons proposé un ensemble d'opportunités d'amélioration pour structurer et formaliser le processus PDP de notre partenaire industriel.

- Chapitre 4 : Modélisation du processus PDP 4.0

L'étude Delphi - Régnier a montré que le processus PDP de notre partenaire industriel ne présente aucune dimension d'agilité. En relation avec ceci, l'état de l'art nous avait permis d'identifier l'absence d'études portant sur le choix de groupes technologiques 4.0 les plus adaptés aux PME leur permettant de rendre agiles les processus de planification de la production. Étant donné l'absence de proposition de la communauté scientifique et le besoin industriel de notre partenaire, nous avons formalisé à l'aide d'un groupe d'experts un processus PDP 4.0 sur la base du standard BPMN 2.0<sup>2</sup>. L'association des groupes technologiques 4.0 à certaines activités du PDP nous a permis d'apporter quelques dimensions de l'agilité à ce processus.

- Chapitre 5 : Outil d'optimisation PDP –approche exacte

Les résultats de l'étude Delphi - Régnier ont soulevé un manque d'outils pour supporter la prise des décisions des chefs planificateurs PDP. Suite à une revue de la littérature des approches d'optimisation pour le PDP, nous avons démontré qu'aucune approche existante n'était transposable à un contexte de production d'assemblage sur commande, avec plusieurs lignes d'assemblage, plusieurs articles directeurs, de fabrication par lot et principalement artisanale. Nous avons proposé une approche d'optimisation exacte basée sur un modèle mathématique. Finalement, nous avons validé le modèle avec les données de notre partenaire industriel. Nous avons ensuite comparé les propositions de l'approche avec celles qui avaient réellement été définies par l'entreprise pour un horizon de court moyen terme (17 semaines).

- Chapitre 6 : Outil d'optimisation PDP – approche heuristique

L'approche d'optimisation exacte a permis de proposer une analyse des charges globales et de minimiser le retard dans la livraison des commandes dans un horizon de planification de court moyen terme. Cependant, le temps de calcul était long (> 15000 secondes) et les contraintes de notre partenaire industriel exigeant de considérer un horizon de planification plus long. Nous avons ainsi opté pour une approche

---

<sup>2</sup> Pour plus d'informations sur le standard BPMN : <http://www.bpmn.org/>

d'optimisation heuristique que nous avons également validée à partir de données réelles de notre partenaire industriel.

Enfin, dans le dernier chapitre nous concluons notre travail de recherche en exposant les apports, les limites et les perspectives de recherche.

# Chapitre 1 . État de l'Art : Approches de planification de la production 4.0

## 1.1. Introduction

Les entreprises disposent aujourd'hui d'une quantité croissante d'informations provenant des processus de production, de la chaîne logistique, des produits eux-mêmes et du marché (CEFRIO, 2016). La quantité d'information a augmenté au cours de la quatrième révolution industrielle. Cette révolution est caractérisée par des approches permettant de contrôler les processus de production en synchronisant les flux en temps réel et en rendant possible la fabrication unitaire et personnalisée des produits (Kohler & Weiz, 2016).

Trois stratégies principales, pour la transition vers la quatrième révolution industrielle, ont été proposées par le CEFRIO (2016). Ces stratégies sont basées sur les processus, les produits et les services. La stratégie de processus est fondée sur la transition de la production de masse à la production individualisée. L'analyse des données permet de modifier les décisions de production en temps réel. La stratégie de produit est conçue sur le principe des objets connectés. La collecte de données, au travers des produits, permet d'innover sur le développement de nouveaux prototypes ou d'augmenter l'autonomie d'un produit dans son environnement. La dernière stratégie est reliée au concept d'automatisation des services, alimentée par des données recueillies lors de l'expérience de l'utilisateur avec les produits.

Parmi ces stratégies, l'activité de planification de la production pourrait être classée comme faisant partie de la stratégie de processus. Les systèmes de planification de la production ont jusqu'à présent cherché à équilibrer les priorités et la capacité (Arnold, Chapman et Clive, 2008). Cela consiste à satisfaire la demande tout en assurant une utilisation optimale des ressources disponibles. Des recherches récentes dans ce domaine ont montré que les systèmes actuels de planification de la production se caractérisent par l'utilisation de l'analyse des données pour soutenir une prise de décision décentralisée (Dallasega et al., 2017 ; Erol et Sihn, 2017; Georgiadis et Michaloudis, 2012 ; Kumar *et al.*, 2018 ; Lanza, Stricker et Moser, 2014 ;

Jiang *et al.*, 2017 ; Rajabinasab et Mansour, 2011). Ceci permet de proposer une planification adaptable aux conditions du système de production en temps réel.

L'intégration des groupes technologiques de la quatrième révolution industrielle dans l'activité de planification de la production a fait l'objet de recherches récentes. Ainsi, le nombre de publications sur ce sujet a augmenté depuis l'apparition du terme industrie 4.0 en 2011 (Figure 1).

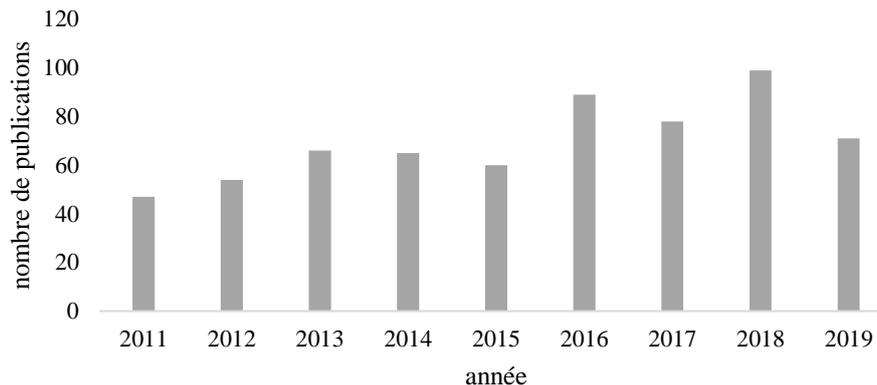


Figure 1 : Nombre de publications par an « Planification de la production et groupes technologiques 4.0»<sup>3</sup>

Les recherches dans ce domaine ont été menées principalement en Allemagne, aux États-Unis et en Chine. La figure 2 montre les dix pays qui ont eu le plus grand nombre de publications dans ce domaine depuis 2011.

Certains chercheurs affirment que l'agilité est le principal déterminant de la quatrième révolution industrielle (Pellerin, 2018 ; CEFRIO, 2016). En effet, les groupes technologiques de cette révolution apportent aux entreprises plus de flexibilité dans les processus, permettent une production plus personnalisée et une réinvention de l'offre commerciale. Néanmoins, les objectifs de l'utilisation des groupes technologiques de la quatrième révolution industrielle, dans les activités de planification de la production, n'ont pas été clairement identifiés dans la littérature.

<sup>3</sup> Les résultats présentés dans cette figure proviennent des résultats d'une recherche menée sur Scopus le 24 août 2019 avec la chaîne de recherche suivante: (TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY ( "Big Data" OR "Simulation" OR "Internet of Things" OR "IoT" OR "Cyber Physical Systems" OR "CPS" OR "Cloud Computing" OR "Collaborative Robots" OR "Machine-to-Machine Communication" OR "comM2M" ) ). Les filtres suivants ont été appliqués pour limiter les résultats : seules les publications à partir de 2011 concernant des articles de revues et des conférences, faisant partie de la liste JCR (Journal Citation Reports) et ayant comme langue de publication l'anglais ont été conservées.

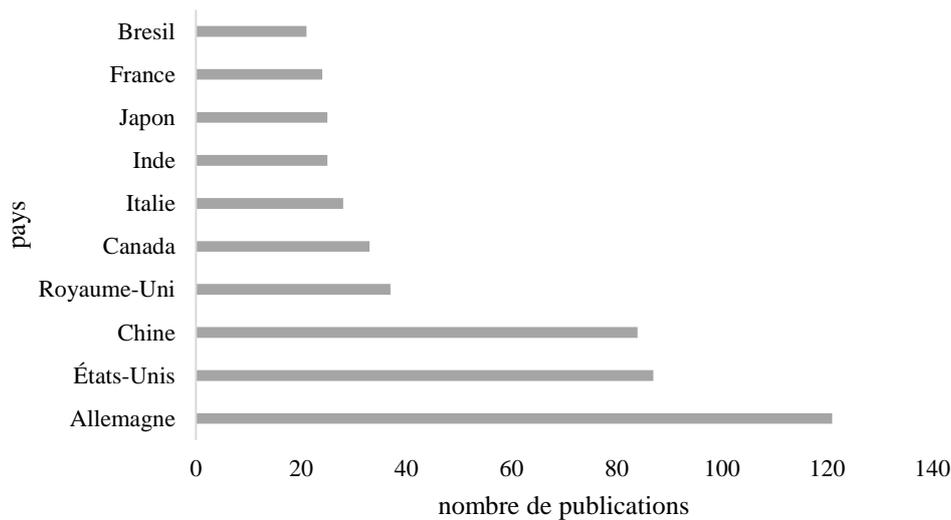


Figure 2 : Les dix premiers pays par nombre de publications depuis 2011- Planification de la production et Groupes technologiques 4.0 <sup>3</sup>

Ce chapitre vise dans un premier temps à proposer un cadre d'analyse pour mener une revue de la littérature et déterminer si les approches de planification de la production dans le cadre de la quatrième révolution industrielle sont à la recherche de l'agilité. Notre second objectif est d'identifier dans la littérature les approches de planification 4.0 appliquées dans des contextes industriels de PME. Le cadre d'analyse proposé repose sur cinq éléments différents : l'activité, l'horizon, les objectifs, la portée et les moyens.

Ce chapitre est organisé comme suit. La section 2 présente le cadre d'analyse et la méthodologie de recherche est présentée dans la section suivante (section 3). La section 4 comporte les résultats selon plusieurs axes d'analyse. Une discussion basée sur les contributions et les perspectives de recherche est exposée dans la section 5. La section 6 présente les conclusions sur les opportunités de recherche dans ce domaine. Enfin, pour faire suite aux résultats de l'État de l'Art nous présentons l'objectif de recherche (section 7).

## 1.2. Cadre d'analyse

Ce chapitre cherche à caractériser les approches de planification de la production au regard de la quatrième révolution industrielle. Nos trois principaux objectifs de recherche sont les suivants :

- Identifier les dimensions de l'agilité recherchées dans les nouvelles approches de planification de la production proposées lors de la quatrième révolution industrielle ;

- Identifier la portée de ces approches ; et
- Identifier les moyens employés par ces approches.

Nous proposons un cadre d'analyse fondée sur les perspectives suivantes : activité de planification de la production, horizon de planification, agilité, taille de l'entreprise, groupe technologique 4,0 et approche de résolution. Chacune des perspectives proposées est en relation avec l'un des objectifs de recherche.

### 1.2.1. Caractérisation générale de l'approche de planification de la production

Deux perspectives ont été proposées pour caractériser l'approche de la planification de la production. La première concerne l'activité de planification de la production. En nous appuyant sur les travaux d'Arnold, Chapman et Clive (2008), nous proposons de classer les activités dans les quatre catégories suivantes : définition des quantités à produire par groupes de produits pour chaque période (ND : pour les niveaux de demande), précision des niveaux de stocks souhaités (NS : pour les niveaux de stocks), définition des ressources nécessaires (RN : ressources nécessaires) et détermination de la disponibilité des ressources nécessaires (DR : disponibilité des ressources). L'approche proposée peut contribuer à plusieurs activités de planification.

Pour la seconde perspective, les trois horizons de planification classiques ont été conservés, soit : opérationnel, tactique et stratégique. Le niveau stratégique cherche à déterminer les actions à mener pour soutenir la mission, les buts et les objectifs d'une organisation (APICS, 2011). Le plan stratégique définit les gammes de produits et les marchés que l'entreprise souhaite développer (Arnold, Chapman et Clive, 2008). Le niveau de planification tactique synchronise les activités entre les fonctions qui spécifient les niveaux de production, la capacité, les ressources, le financement entre autres, pour atteindre les buts et objectifs tactiques et soutenir le plan stratégique (APICS, 2011). Le niveau opérationnel propose des plans à court terme détaillant des actions pour atteindre les objectifs fixés au niveau tactique (APICS, 2011). Les activités menées à ce niveau assurent la mise en œuvre, le contrôle de la production et des flux de matières premières dans l'entreprise en fonction des objectifs fixés au niveau tactique (Arnold, Chapman et Clive, 2008). Chaque niveau de planification est lié à des périodes différentes : court terme (O : opérationnel, entre une semaine et un mois), moyen terme (T : tactique, entre six et 18 mois) et long terme (S : stratégique, entre deux et cinq ans). Certaines approches cherchent à couvrir plusieurs horizons de planification.

### 1.2.2. Agilité

Le premier objectif de recherche de cette étude est d'identifier la dimension d'agilité recherchée lors de l'application des approches de planification de la production dans la quatrième révolution industrielle. L'agilité, telle que définie de façon formelle du côté des opérations militaires (Alberts et Hayes, 2003), est une combinaison synergique des dimensions suivantes :

- Robustesse : capacité à maintenir l'efficience dans une série de tâches, de situations et de conditions ;
- Résilience : la capacité à se remettre ou à s'adapter après un incident, un dégât ou une perturbation ;
- Réactivité : la capacité à réagir à un changement dans l'environnement en peu de temps ;
- Flexibilité : la capacité d'utiliser de multiples moyens pour réussir et la capacité de passer d'un moyen à l'autre sans difficulté ;
- Innovation : la capacité de faire de nouvelles choses, mais aussi de faire les anciennes de manière nouvelle ; et
- Adaptation : la capacité de modifier les processus de travail et l'organisation.

Pellerin (2018) a souligné que ces dimensions sont analytiquement distinctes, mais qu'elles sont souvent interdépendantes. Par conséquent, une approche unique de planification de la production pourrait aborder plusieurs dimensions d'agilité.

### 1.2.3. Portée de l'approche de planification de la production

Le second objectif de cette recherche est d'identifier dans la littérature les approches de planification 4.0 appliquées dans des contextes industriels de PME. Nous cherchons donc à identifier la portée de l'approche de planification de la production. Trois catégories ont été définies : grandes entreprises, PME et non spécifiées. Les PME ont été définies par la Commission européenne, en 2008, comme des entreprises qui n'ont pas plus de 250 employés et qui ont un chiffre d'affaires total qui ne dépasse pas 50 millions d'euros (European Commission, 2008). La catégorie non spécifiée fait référence aux applications expérimentales pour lesquelles les chercheurs n'ont pas précisé le contexte industriel dans lequel l'approche a été appliquée.

#### 1.2.4. Moyens de l'approche de planification de la production

Les moyens ont été étudiés selon deux perspectives : les groupes technologiques de l'industrie 4.0 et les approches de résolution. Nous utilisons les groupes technologiques proposés par l'étude du Boston Consulting Group (Ruessmann, et al., 2015). Dans leur recherche, les neuf technologies suivantes ont été identifiées comme piliers de l'industrie 4.0: données massives, simulation, internet des objets (IdO), systèmes cyberphysiques (CPS), infonuagique (de l'anglais Cloud Computing), réalité virtuelle, cybersécurité, robots collaboratifs et communication machine à machine. L'analyse de la littérature ici présentée portera sur les groupes technologiques suivants :

- L'analyse de données massives : concerne la collecte et l'évaluation des données, provenant de différentes sources et systèmes d'information (de l'entreprise et du client), qui permettent de prendre des décisions en temps réel ;
- La simulation : cette technologie permet d'exploiter des données en temps réel pour reproduire le monde physique dans un modèle virtuel intégrant des machines, des produits et des ressources humaines. Différents scénarios peuvent être construits afin d'optimiser le modèle virtuel avant d'apporter des changements dans le système réel ;
- L'internet des objets (IdO) : intègre des dispositifs et des connexions permettant aux objets physiques de communiquer leur état en temps réel. Cette technologie permet de décentraliser la prise de décision grâce au contrôle de l'état de produits ;
- Les systèmes cyberphysiques (CPS) : connectent les produits et processus physiques avec leur environnement pour permettre au système de se reconfigurer en temps réel en fonction des besoins (Geisberger & Broy, 2012) cités par Berger et al. (2019) ;
- L'infonuagique : fournit aux utilisateurs un accès à un vaste ensemble de données et de ressources informatiques grâce à des techniques informatiques de partage et à des interfaces multiples (Tang et al., 2017) ; et
- La réalité virtuelle : permet de représenter virtuellement un environnement. Les utilisateurs peuvent visualiser des produits réels et, en même temps, des objets simulés. Ceci leur permet d'étudier la structure géométrique des produits et d'analyser s'il est possible de modifier la conception et la séquence de fabrication (Wandt, Friedewald et Lödging, 2012).

Certaines approches de planification de la production font recours à plusieurs technologies. Une analyse approfondie sur le choix des groupes technologiques sélectionnés est présentée dans la section méthodologie de recherche.

La seconde perspective des moyens employés concerne l'approche de résolution. Ceci fait référence au mécanisme permettant de calculer le plan de production. Trois catégories ont été définies pour cette perspective : l'apprentissage automatique (en anglais Machine Learning), l'optimisation et la simulation. L'intelligence artificielle (IA) est une branche de l'informatique qui vise à programmer des machines pour résoudre des problèmes, apprendre, planifier et manipuler des objets. Nous nous sommes concentrés sur l'apprentissage automatique comme domaine de recherche de l'IA. L'apprentissage automatique vise à générer des données de sortie à partir de l'identification de tendances par l'analyse de données d'entrée et les régressions numériques.

Pour l'optimisation, trois groupes principaux ont été définis : les méthodes exactes, les métaheuristiques et les heuristiques. Les méthodes exactes comprennent la programmation linéaire, la programmation par contraintes et l'algorithme de séparation et évaluation (de l'anglais branch and bound). Les métaheuristiques sont des approches de résolution stochastique qui visent à trouver et à approcher la solution optimale par des processus itératifs. Ces algorithmes peuvent être inspirés des systèmes naturels, comme l'algorithme génétique, des phénomènes physiques, comme l'algorithme du recuit simulé et du comportement animal, l'algorithme de colonie de fourmis. L'inspiration dans les phénomènes naturels est la principale différence avec l'heuristique, qui cherche à trouver des solutions valables, mais pas nécessairement optimales.

Enfin, la catégorie simulation comprend la simulation à événements discrets, les systèmes multi-agents et le jumeau numérique.

### 1.3. Stratégie de Revue de la Littérature

L'état de l'art a été réalisé à l'aide de deux bases de données scientifiques : Science Direct et Scopus. Nous avons retenu les publications de revues scientifiques et les articles de conférence. Seules les références publiées depuis 2011 ont été conservées (année d'apparition du terme industrie 4.0). Seules les références dont la source faisait partie de la liste du JCR 2019 ont été

prises en compte. Enfin, pour des raisons pratiques, seuls les documents qui ont été publiés en anglais ont été pris en considération.

Plusieurs chaînes de recherche ont été utilisées dans les deux bases de données. Ces chaînes de recherche étaient construites par deux groupes principaux de mots clés. Le premier groupe faisait référence à la planification de la production. Divers synonymes ont été utilisés pour construire la première partie des chaînes de recherche. Le second groupe prenait en compte certaines technologies de la quatrième révolution industrielle. Les chaînes de recherche suivantes ont été employées dans les deux bases de données :

- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("Simulation");
- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("Cloud Computing");
- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("IoT" OR "Internet of Things");
- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("CPS" OR "Cyber Physical Systems");
- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("Big Data"); et
- TITLE-ABS-KEY("Production Scheduling" OR "Production Planning" OR "Line Balancing" OR "Manufacturing Planning" OR "Operation Planning" OR "Production Sequency" OR "Capacity Planning") AND TITLE-ABS-KEY("Virtual Reality").

En utilisant les cinq chaînes de recherche précédemment mentionnées, nous avons trouvé 777 références avec 29 références en doublons. Les références du groupe technologique - simulation

ont été sélectionnées à partir des deux revues de la littérature effectuée précédemment par l'équipe de recherche (Tobón Valencia et al., 2019 a et b). Pour les autres technologies (infonuagique, IdO, systèmes cyberphysiques, données massives et réalité virtuelle), nous avons effectué une première analyse pour exclure les sujets suivants : automatisation et contrôle, gestion de l'énergie, interopérabilité des systèmes d'information et robotique. À partir de cette sélection, nous avons retenu 53 références sur 153.

À la lumière des activités de planification de la production proposées par Arnold, Chapman et Clive (2008), qui ont été préalablement évoquées, une analyse du texte intégral a été réalisée. Cette analyse nous a permis de réduire de 53 à 33 le groupe de références sélectionnées. Ce groupe a été complété par 13 références du groupe technologique - simulation. Enfin, nous avons analysé 46 références avec le cadre proposé.

La figure 3 synthétise la méthodologie décrite précédemment. Ensuite, nous présentons des informations détaillées sur le processus de sélection des références, par groupe technologie de l'industrie 4.0, dans le tableau 1.

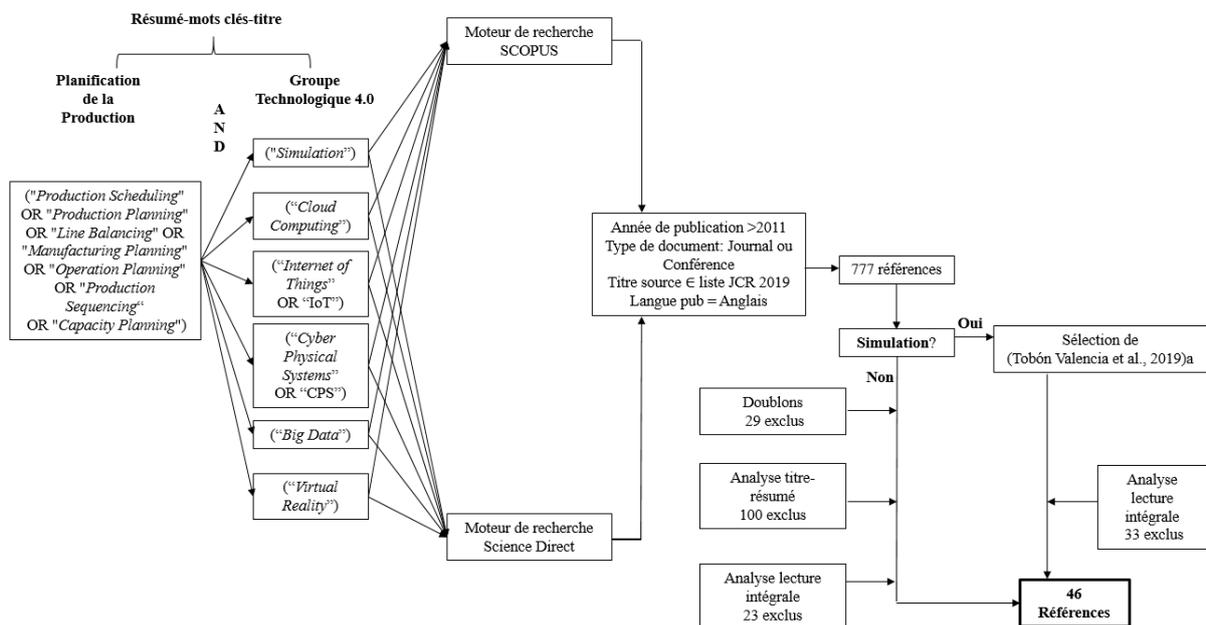


Figure 3 : Méthodologie de Recherche

Groupe Technologique 4.0	Nombre total de références retrouvées sur Scopus	Nombre total de références retrouvées sur Science Direct	Doublons	Première sélection	Sélection lecture intégrale
<b>Simulation</b>	388	207	-	-	13
<b>Infonuagique</b>	14	16	2	8	5
<b>IdO</b>	23	16	8	15	10
<b>CPS</b>	33	23	8	20	16
<b>Données massives</b>	11	10	5	3	1
<b>Réalité virtuelle</b>	31	5	6	7	1

Tableau 1 : Sélection de références

La sélection des six groupes technologiques retenus pour construire les chaînes de recherche est issue d'une analyse que nous avons effectuée à l'aide du logiciel VOSviewer. Nous avons construit des chaînes de recherche similaires à celles présentées précédemment pour huit des neuf technologies définies par (Ruessmann, et al., 2015). Nous n'avons pas inclus la cybersécurité dans l'analyse. Ensuite, nous avons appliqué les mêmes filtres (année de publication, type de source et sélection du titre de la source) pour collecter toutes les publications figurant dans Science Direct et Scopus. Nous avons supprimé les doublons (113 références ont été exclues). Enfin, nous avons importé la liste de références résultante vers le logiciel VOSviewer (664 références).

L'étude réalisée avec le logiciel VOSviewer nous a permis de trouver parmi les 664 références la relation existante entre les mots-clés employés par les auteurs. Il a également été possible d'identifier les groupes technologiques de la quatrième révolution industrielle que les auteurs ont le plus exploités dans les références traitant de la planification de la production. Les technologies suivantes sont celles qui ont le plus grand nombre de références : les données massives, l'infonuagique, les systèmes cyberphysiques, l'IdO, la simulation et la réalité virtuelle. À partir de cette analyse, nous avons décidé de nous concentrer uniquement sur les références qui exploitent l'une de ces technologies. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la figure 4. Les technologies sont encadrées.

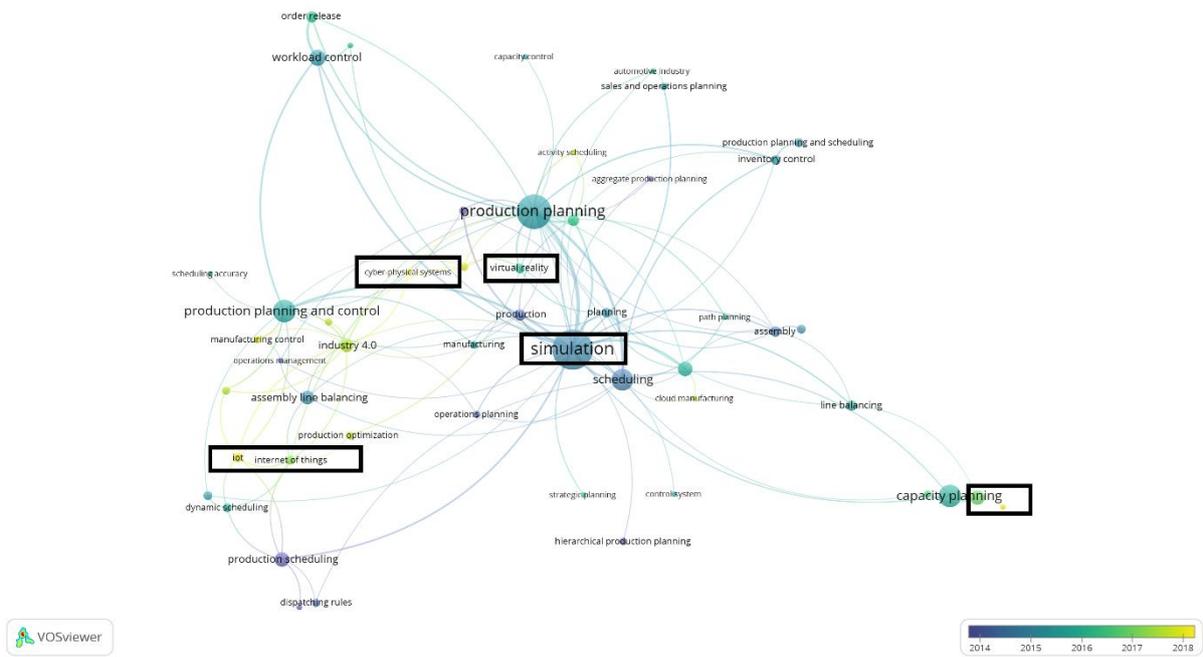


Figure 4 : Sélection des six groupes technologiques 4.0 - Partie 1

Un agrandissement du côté droit de la figure 5 est présenté ci-dessous pour montrer l'apparition des deux technologies, qui n'étaient pas lisibles :

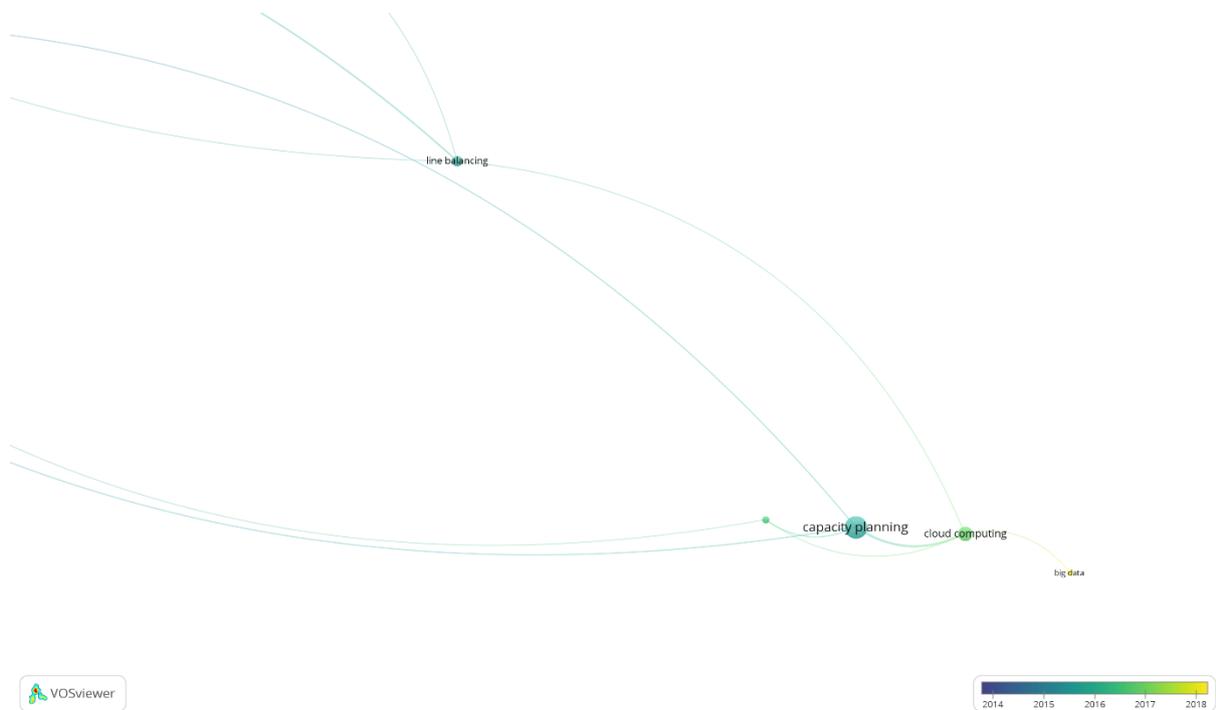


Figure 5 : Sélection des six groupes technologiques 4.0 - Partie 2

## 1.4. Analyse de la littérature et résultats

Les résultats et l'analyse que nous présentons dans cette section sont faits sur 46 références sélectionnées. Dans le tableau 2, nous présentons la distribution de références sélectionnées pour l'analyse par source d'information.

Le reste de cette section est structuré en trois parties qui visent à développer chacun des trois objectifs de recherche. Dans la première partie, nous caractérisons l'approche de la planification de la production à travers les dimensions suivantes : activité de planification de la production et horizon de planification. Dans la deuxième partie, nous analysons la ou les dimensions d'agilité recherchées par l'approche. Ensuite, nous présentons les résultats concernant la portée de chaque approche.

	<i>Source</i>	<i>Références sélectionnées</i>
<i>CIRP</i>		9
<i>IEEE</i>		9
<i>International Journal of Production Research</i>		6
<i>Journal of Manufacturing Systems</i>		3
<i>FAIM- International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering</i>		2
<i>IFAC</i>		2
<i>Computers and Industrial Engineering</i>		1
<i>European Journal of Operational Research</i>		1
<i>International Journal of Simulation, Systems, Science &amp; Technology</i>		1
<i>CASE- International Conference in Automation Science and Engineering</i>		1
<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>		1
<i>Journal of Open Innovation</i>		1
<i>Journal of Engineering Manufacture</i>		1
<i>Advances in Mechanical Engineering</i>		1
<i>Knowledge Based Systems</i>		1
<i>Computers and Operations Research</i>		1
<i>DET- Conference on Digital Enterprise Technology</i>		1
<i>Production Planning and Control</i>		1
<i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i>		1
<i>International Journal of Operations Research</i>		1
<i>12th conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering</i>		1
<i>Total number of articles</i>		46

Tableau 2 : Répartition des articles par source

Dans la quatrième partie, nous présentons la classification des moyens employés sur la base de groupes technologiques 4.0 et de l'approche de résolution. Enfin, nous proposons une discussion générale impliquant toutes les dimensions du cadre d'analyse est proposée.

## 1.4.1. Caractérisation de l'approche de planification de la production

### 1.4.1.1. Activité de planification de la production

La détermination de la disponibilité des ressources nécessaires est l'activité privilégiée des approches étudiées. Parmi les références étudiées, 37 références sur 46 étaient orientées vers cette activité de planification de la production. La figure 6 montre la distribution des approches dans les activités de planification. Les résultats ici présentés révèlent que la répartition des approches dans les activités de planification de la production proposées n'est pas du tout uniforme. Le détail de la classification de chaque approche par activité de planification de la production est présenté dans le tableau 3.

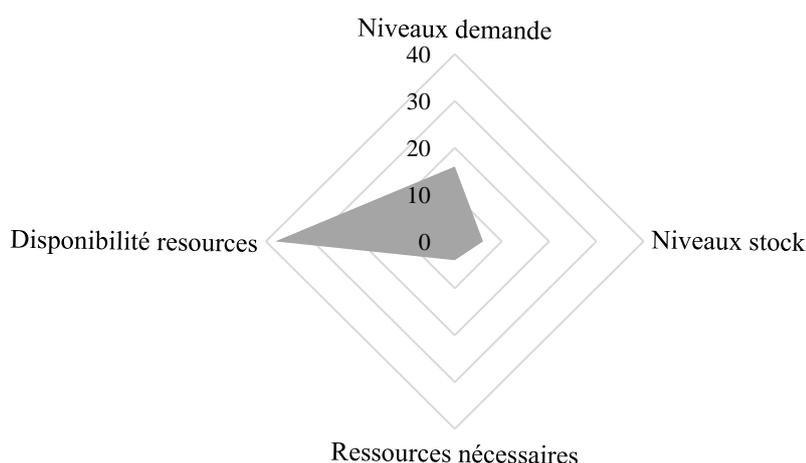


Figure 6 : Distribution des approches par activité de planification de la production

Afin de mieux classer les approches qui ont abordé la détermination de la disponibilité des ressources, nous avons proposé une classification supplémentaire pour cette activité. Nous avons proposé ces groupes à partir des activités trouvées dans les références étudiées. Nous avons quatre groupes : problèmes d'ordonnancement, aide à la prise de décision, allocation des ressources dans les lignes de production et autres.

#### 1.4.1.1.1. Problèmes d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement était au cœur de 22 approches. De multiples approches ont proposé de générer un nouveau plan de production lorsque des changements, des interruptions ou des perturbations imprévus se produisaient (Berger et al., 2019 ; Iannino et al., 2018 ; Jiang et al., 2017 ; Lanza, Stricker et Moser, 2014 ; Lin et al., 2018 ; Mourtzis et Vlachou, 2018 ; Nonaka et al., 2015 ; Qu et al., 2016 ; Rossit, Tohmé et Frutos, 2019 ; Shamsuzzoha et al., 2016 ; Shpilevoy et al., 2013 ; Xu et Chen, 2016 ; Xu et Chen, 2017 ; Zhou et al., 2019). Les perturbations varient d'une référence à l'autre. Les auteurs ont notamment étudié les perturbations associées aux commandes clients, aux pannes machines, aux ruptures de matières premières et à l'absentéisme. De multiples solutions ont été proposées pour rendre le système adaptable aux perturbations.

Une approche reposant sur le contrôle de la production en fonction d'événements a été proposée par Berger et al. (2019). Nonaka et al. (2015) ont proposé d'ajouter des machines ou des opérateurs dans les goulets pour rétablir la production. Une stratégie d'actions locales et globales a été proposée par Lanza, Stricker et Moser (2014) pour faire face aux perturbations. Au niveau local, leur système pouvait choisir entre traiter la pièce dans une ressource différente avec capacité disponible, changer la séquence de production ou changer le processus de production. À l'échelle globale, la tâche pouvait être affectée à un site de production différent. Leur objectif était de minimiser l'effet de la perturbation du système en termes de délai et de productivité.

Xu et Chen (2016) ont présenté un cadre de planification dynamique permettant d'identifier les ressources et la capacité nécessaires pour traiter une commande (en heures). Les mêmes auteurs ont proposé de recueillir des données du processus de fabrication, en temps réel, afin d'ajuster les plans en fonction de variations de l'environnement de production (Xu et Chen, 2017). L'exploitation des données en temps réel a été également employée dans les approches de Wang et al. (2019), Zhou et al. (2019) et Zhu, Qiao et Cao (2017). Le premier groupe d'auteurs a proposé un modèle d'optimisation permettant d'obtenir un plan de production adaptable aux ressources disponibles. Zhou et al. (2019) ont employé des données récupérées en temps réel comme entrée d'une simulation permettant de générer un plan d'ordonnancement optimal, en termes d'utilisation de ressources. Zhu, Qiao et Cao (2017) ont proposé une approche d'ordonnancement pour les systèmes de production qui recueillent des données par le biais des systèmes cyberphysiques. Lin et al. (2018) ont présenté un modèle permettant d'assurer la

traçabilité et la visibilité du processus de production en temps réel. Ils cherchaient à minimiser les temps d'attente, de préparation et les retards. Mourtzis et Vlachou (2018) ont proposé de reprogrammer les opérations en attente lorsque des perturbations étaient détectées. Les tâches en cours restaient telles qu'elles étaient programmées dans le plan.

D'autres approches ont été proposées pour améliorer l'activité d'ordonnement elle-même. Asadzadeh (2015), Helo, Phuong et Hao (2019) et Tang et al. (2017) ont utilisé des métaheuristiques tandis que Waschneck et al. (2018) ont employé des techniques d'apprentissage machines. En fonction de la disponibilité des ressources et des délais de traitement des commandes, leur algorithme proposait un plan d'ordonnement. Rajabinasab et Mansour (2011), Saif et al. (2019) et Shim, Park et Choi (2018) ont présenté des approches de planification qui cherchaient à utiliser au mieux les capacités disponibles et à minimiser les délais de traitement de commandes. Une nouvelle approche d'ordonnement dans laquelle les produits individuels étaient planifiés de manière progressive a été proposée par Klein et al. (2018).

Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017) ont proposé une méthode exacte (APC) qui visait à équilibrer la capacité et la charge dans les différents postes de charge en fonction des dates de livraison des commandes.

#### 1.4.1.1.2. Aide à la prise de décisions

Les approches présentées par Denno, Dickerson et Anne (2018), Engelhardt et Reinhart (2012) et Leusin et al. (2018) visaient à soutenir la prise de décision dans les activités de lancement des ordres de fabrication, de contrôle des capacités et de séquençement. Un système autonome de lancement des ordres de fabrication a été proposé par Kuhnle, Röhrig et Lanza (2019). Leur approche s'appuyait sur les systèmes cyberphysiques et l'apprentissage machines. Le processus de prise de décision était orienté vers l'optimisation de la charge de travail, de la cadence de production et du retard.

La prise de décision locale, concernant la disponibilité des ressources et les exigences produit, a été considérée dans l'approche présentée par Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017). La prise de décision décentralisée a été mise en œuvre à l'aide de systèmes cyberphysiques dans l'approche présentée par Gräbler et Pöhler (2018).

Une approche qui exploitait la simulation et la réalité virtuelle pour aider les planificateurs à prendre des décisions, en cas de perturbation, a été proposée par Wandt, Friedewald et Lödning (2012). La simulation permettait d'évaluer l'utilisation de ressources pour valider un nouveau plan.

#### 1.4.1.1.3. Allocation de ressources dans les lignes de production

Erol et Sihn (2017) ont présenté une approche fondée sur des lignes de production reconfigurables. Leur approche avait comme objectif d'effectuer une allocation optimale des ressources de production. À partir d'une commande, leur modèle permettait de trouver le processus optimal pour programmer les opérations. Dans le même esprit, Kubo et al. (2016) ont proposé une méthodologie pour simuler l'allocation de ressources dans un système de production reconfigurable. Un modèle de reconfiguration de lignes de production pour faire face aux perturbations a été proposé dans la recherche menée par Lanza, Stricker et Peters, (2013).

#### 1.4.1.1.4. Autres

Une approche de planification de la production, à moyen et court terme, a été proposée par Li et al. (2017). Les auteurs cherchaient à minimiser le retard, le cycle de production et à optimiser l'utilisation de la capacité.

En ce qui concerne l'allocation des ressources pour des horizons à court terme, les approches présentées dans les travaux de Biesinger et al. (2019), Graessler et Poehler (2017) et Ruppert et Abonyi (2018) ont proposé des solutions. Ils employaient la mise à jour en temps réel des temps de cycle. Leur objectif était de maximiser la productivité et d'éviter les arrêts de production.

La deuxième activité de planification de la production, la plus étudiée dans les approches analysées, était la définition des niveaux de demande. Seize approches ont abordé cette activité. Un nombre important d'approches a cherché à déterminer les quantités à produire à court terme (Denno, Dickerson et Anne, 2018 ; Kumar et al., 2018 ; Lanza, Stricker et Peters, 2013 ; Lin et al., 2018 ; Nonaka et al. 2015 ; Qu et al., 2016 ; Saif et al. 2019 ; Xu et Chen 2017).

Les approches présentées par Qu et al. (2016), Saif et al. (2019), Shim, Park et Choi (2018), Shpilevoy et al. (2013) et Zhu, Qiao et Cao (2017), abordaient la définition des quantités à produire avec des fonctions objectifs similaires. Qu et al. (2016) ont cherché à minimiser les

retards et les délais de livraison. Saif et al. (2019) ont proposé de minimiser les délais de fabrication et les temps de préparation lorsque différentes références de produits doivent être fabriquées. Shim, Park et Choi (2018) et Shpilevoy et al. (2013) avaient pour objectif de minimiser les délais de livraison. Zhu, Qiao et Cao (2017) ont cherché à minimiser le temps de cycle.

Certaines références ont présenté des propositions pour la définition des quantités à produire lorsque des événements imprévus se produisent. L'approche proposée par Wang et al. (2019) a considéré de nouvelles commandes clients pour établir un nouveau plan de production. Zhou et al. (2019) ont inclus l'analyse de la disponibilité des matières premières dans la planification à court terme.

Fang et al. (2016) ont étendu l'activité de planification de la production aux chaînes d'approvisionnement en boucle fermée. Ils ont considéré les retours et la perte de valeur associée à leurs stockages pour définir les niveaux de demande.

Une seule référence analysée considérait la définition des niveaux de demande dans un horizon tactique (Shamsuzzoha et al., 2016).

Avec six références, la précision des niveaux de stocks souhaités occupent la troisième place des activités de planification de la production étudiées (Dallasega et al. 2017; Fang et al. 2016 ; Georgiadis et Michaloudis 2012; Kumar et al. 2018 ; Meyer, Hans Wortmann et Szirbik 2011 ; Um, Choi et Stroud 2014).

Dallasega et al. (2017) ont présenté une approche de planification de la production pour optimiser les niveaux des inventaires sur site et hors site dans l'industrie de la construction. Les objectifs de leur approche étaient d'éviter le surstockage sur site afin de réduire le risque de dommages, et d'éviter les interruptions de construction associées à la rupture de la disponibilité des composants sur site. Georgiadis et Michaloudis (2012) ont cherché à définir les valeurs optimales des en-cours. Meyer, Hans Wortmann et Szirbik (2011) ont étendu la définition des niveaux d'inventaire aux activités d'approvisionnement, de production et d'expédition. L'approche proposée par Um, Choi et Stroud (2014) permettaient de définir les quantités à fabriquer en sous-traitance pour réduire les coûts de maintien des stocks.

<i>Dimension</i> <i>Références</i>	<i>Activité Production Planification</i>				<i>Horizon Planification</i>		
	ND	NS	RN	DR	O	T	S
(Asadzadeh, 2015)				x	x		
(Berger <i>et al.</i> , 2019)				x	x		
(Biesinger <i>et al.</i> , 2019)				x	x		
(Dallasega <i>et al.</i> , 2017)		x			x		
(Denno, Dickerson et Anne, 2018)	x			x	x		
(Engelhardt et Reinhart, 2012)				x	x		
(Erol et Sihh, 2017)				x	x	x	
(Fang <i>et al.</i> , 2016)	x	x			x	x	x
(Georgiadis et Michaloudis, 2012)		x			x		
(Graessler et Poehler, 2017)				x	x		
(Gräbler et Pöhler, 2018)			x	x	x		
(Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter, 2017)				x	x		
(Helo, Phuong et Hao, 2019)				x	x		
(Iannino <i>et al.</i> , 2018)				x	x		
(Illmer et Vielhaber, 2018)			x			x	
(Jiang <i>et al.</i> , 2017)				x	x		
(Klein <i>et al.</i> , 2018)				x	x		
(Kubo <i>et al.</i> , 2016)			x	x	x		
(Kuhnle, Röhrig et Lanza, 2019)				x	x		
(Kumar <i>et al.</i> , 2018)	x	x			x		
(Lachenmaier, Lasi et Kemper, 2017)				x	x		
(Lanza, Stricker et Peters, 2013)	x			x	x		
(Lanza, Stricker et Moser, 2014)				x	x		
(Leusin <i>et al.</i> , 2018)				x	x		
(Li <i>et al.</i> , 2017)	x				x	x	
(Lin <i>et al.</i> , 2018)	x			x	x		
(Meyer, Hans Wortmann et Szirbik, 2011)		x			x		
(Mourtzis et Vlachou, 2018)				x	x		
(Nonaka <i>et al.</i> , 2015)	x			x	x		
(Qu <i>et al.</i> , 2016)	x			x	x		
(Rajabinasab et Mansour, 2011)				x	x	x	
(Rossit, Tohmé et Frutos, 2019)				x	x		
(Ruppert et Abonyi, 2018)				x	x		
(Saif <i>et al.</i> , 2019)	x			x	x	x	
(Shamsuzzoha <i>et al.</i> , 2016)	x			x	x	x	
(Shim, Park et Choi, 2018)	x			x	x		
(Shpilevoy <i>et al.</i> , 2013)	x			x	x		
(Tang <i>et al.</i> , 2017)			x	x	x		
(Um, Choi et Stroud, 2014)		x				x	
(Wandt et al. 2012)				x	x		
(Wang <i>et al.</i> , 2019)	x			x	x		
(Waschneck <i>et al.</i> , 2018)				x	x		
(Xu et Chen, 2016)				x	x		
(Xu et Chen, 2017)	x			x	x		
(Zhou <i>et al.</i> , 2019)	x			x	x		
(Zhu, Qiao et Cao, 2017)	x			x	x		

Tableau 3 : Caractérisation des approches de planification de la production

Enfin, l'activité de planification de la production la moins étudiée est la définition des ressources nécessaires (Gräbler et Pöhler (2018), Illmer et Vielhaber 2018, Kubo et al. 2016, Tang et al. 2017). Illmer et Vielhaber (2018) proposaient une approche fondée sur l'intégration

des systèmes cyberphysiques et de la conception. Ils cherchaient à déterminer les besoins capacitaires. Afin de s'assurer qu'aucune ressources de production ne soit sous-utilisée, Tang et al. (2017) ont introduit une méthode d'équilibre de charge-capacité en ligne et hors ligne pour identifier les ressources nécessaires. Les travaux Kubo et al. (2016) proposaient une reconfiguration du processus de fabrication, à partir des ressources alternatives, lorsqu'un événement inattendu se produisait.

#### 1.4.1.2. Horizon de planification

Pour cette perspective d'analyse, presque toutes les approches ont considéré l'horizon de planification à court terme (43 des 46 références étudiées). Les résultats présentés dans la figure 7 révèlent que dans la quatrième révolution industrielle, les approches de planification de la production se sont concentrées sur le niveau de planification opérationnelle. Pour plus de détails sur l'horizon de planification étudié par les approches, voir le tableau 3.

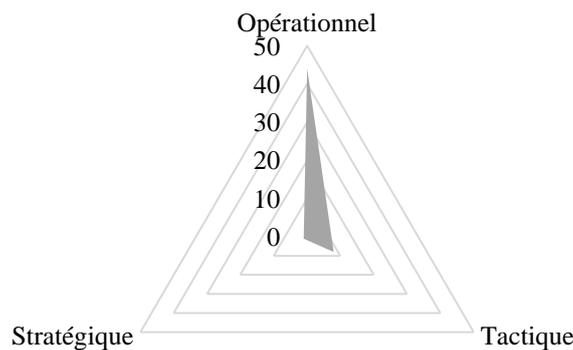


Figure 7 : Distribution des approches par horizon de planification

Au niveau opérationnel, un certain nombre d'approches ont abordé l'ordonnancement (Asadzadeh 2015;Helo, Phuong et Hao 2019;Jiang et al. 2017; Klein et al.2018; Kumar et al. 2018; Shim, Park et Choi 2018 ; Tang et al. 2017;Waschneck et al., 2018; Zhu, Qiao et Cao 2017) et les activités de contrôle (Kuhnle, Röhrig et Lanza 2019, Leusin et al. 2018).

De nouveaux concepts sont apparus dans les approches de la planification de la production qui abordaient l'horizon à court terme. L'un d'entre eux était la génération de plans pour faire face à des perturbations ou à des interruptions en temps réel. Les approches suivantes ont abordé ce concept : Berger et al.(2019), Engelhardt et Reinhart (2012) , Georgiadis et Michaloudis (2012),

Iannino et al. (2018), Kubo et al. (2016), Lanza, Stricker et Peters (2013), Meyer, Hans Wortmann et Szirbik (2011), Qu et al. (2016), Rossit, Tohmé et Frutos (2019), Shpilevoy et al. (2013), Wandt, Friedewald et Lödding (2012), Wang et al. (2019). Un autre concept innovant était la génération de plans à court terme à partir de la collecte et l'analyse de données de l'environnement de production en temps réel. Dans les travaux de Biesinger et al. (2019) ; Denno, Dickerson et Anne (2018), Graessler et Poehler (2017), Gräbler et Pöhler (2018), Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017), Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017), Lin et al. (2018), Mourtzis et Vlachou (2018), Ruppert et Abonyi (2018), Xu et Chen (2016), Xu et Chen (2017) et Zhou et al. (2019), la planification en temps réel a été étudiée.

Dans un horizon de planification à court terme, cinq approches ont été proposées pour définir les niveaux d'inventaire (Dallasega et al. 2017; Fang et al. 2016; Georgiadis et Michaloudis 2012 ; Kumar et al. 2018 ; Meyer, Hans Wortmann et Szirbik 2011).

L'horizon de planification à moyen terme a été abordé uniquement par deux approches. Illmer et Vielhaber (2018) ont proposé un modèle pour intégrer les systèmes cyberphysiques et la conception CAO pour planifier les besoins capacitaires à moyen terme. Um, Choi et Stroud (2014) n'ont pas précisé l'horizon de planification auquel le modèle s'intéressait. Cependant, les quantités à produire par sous-traitant ont été spécifiées dans un horizon à moyen terme.

Les autres approches qui disaient considérer le moyen terme étaient plutôt centrées court terme (Erol et Sihn 2017 ; Li et al. 2017 ; Rajabinasab et Mansour 2011 ; Saif et al., 2019 ; Shamsuzzoha et al. 2016), ou aux trois horizons de planification (Fang et al., 2016).

#### 1.4.2. Agilité

Cinq dimensions de l'agilité ont été proposées pour déterminer si les approches de planification de la production cherchaient à améliorer l'agilité. Nous avons pu classer toutes les références étudiées dans l'une des dimensions. La réactivité est la dimension de l'agilité privilégiée par les approches étudiées (32 références sur 46 ont visé cette dimension de l'agilité). La figure 8 montre la répartition des approches dans les dimensions d'agilité. Pour une classification spécifique de chaque approche dans la dimension de l'agilité (tableaux 4 et 5).

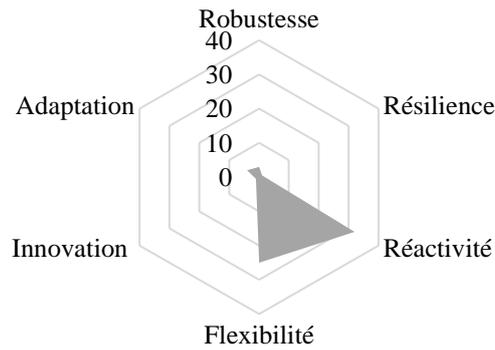


Figure 8 : Distribution des approches par dimension d'agilité

#### 1.4.2.1. Réactivité

À partir de l'identification des perturbations dans l'environnement de production, les approches suivantes ont présenté des alternatives pour combiner des moyens et réagir en temps opportun. Berger et al. (2019) ont proposé un système de contrôle (en boucle fermée) pour identifier les perturbations et prendre des mesures correctives pour maintenir la production. Denno, Dickerson et Anne (2018) ont présenté un modèle qui répond aux perturbations de la capacité, leur modèle permet aussi de détecter les postes de travail qui nécessitent plus de temps pour traiter une tâche spécifique.

Gräbler et Pöhler (2018) ont présenté un système qui réagit lorsque des dysfonctionnements ou des ruptures de matières sont détectés par le système cyberphysique. Les systèmes cyberphysiques ont également été utilisés dans l'approche proposée par Biesinger et al. (2019). À l'aide d'un jumeau numérique automatisé, ils ont essayé de minimiser le temps nécessaire pour intégrer un nouveau produit au processus de production. Iannino et al. (2018) ont utilisé un système multi-agent pour choisir la meilleure stratégie de travail et pour adapter des paramètres du processus.

Jiang et al. (2017) ont présenté un algorithme de repositionnement des ordres de fabrication qui cherchait à minimiser le temps total de traitement des commandes. L'approche de Lin et al. (2018) était basée sur la synchronisation verticale et horizontale des processus de planification. Ils cherchaient à respecter les dates de livraison des commandes.

Kubo et al. (2016) ont utilisé des véhicules autoguidés qui, sur la base du plan de production, envoyaient les pièces à la ressource disponible en cas de panne machines. Kuhnle, Röhrig et

Lanza (2019), Lanza, Stricker et Peters (2013), Mourtzis et Vlachou (2018), ont proposé des approches pour repositionner les ordres de fabrication en cas de variation de la capacité. Leusin et al. (2018), Meyer, Hans Wortmann et Szirbik (2011), Xu et Chen (2017), ont proposé des approches de planification autonomes et capables de prendre des mesures correctives lorsque des perturbations étaient détectées. Similairement, Nonaka et al. (2015) ont proposé un système capable de détecter les pannes machines et de prévoir leur impact sur le plan de production dans un horizon de planification court terme. Une fois la défaillance détectée, des machines ou des opérateurs étaient attribués aux goulets afin de reprendre la production. Waschneck et al. (2018) ont proposé d'analyser la disponibilité des ressources à travers l'apprentissage machines. Ils cherchaient à proposer des plans de production en temps réel pour assurer une vitesse continue de la production.

Engelhardt et Reinhart (2012), Helo, Phuong et Hao (2019), Rossit, Tohmé et Frutos (2019), Shamsuzzoha et al. (2016), Shim, Park et Choi (2018), Shpilevoy et al. (2013), Tang et al. (2017), Wandt, Friedewald et Lödding (2012) et Zhou et al. (2019) ont présenté des approches de planification qui visaient à réduire le temps de réponse face aux événements inattendus. Ils cherchaient, en même temps, à fiabiliser les dates de livraison dans des horizons court terme. L'approche présentée par Li et al. (2017) avait les mêmes objectifs, mais elle couvrait également la planification à moyen terme.

Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017), Leusin et al. (2018) et Saif et al. (2019) ont proposé des systèmes de planification adaptables à l'intégration des nouvelles commandes dans la planification court terme. L'approche présentée par Saif et al. (2019) envisageait l'acceptation de nouvelles commandes dans le moyen terme. Les approches présentées par Georgiadis et Michaloudis (2012) et Xu et Chen (2016) envisageaient de proposer un nouveau plan de production en cas d'annulations de commande.

#### 1.4.2.2. Flexibilité

Les approches étudiées proposaient une grande variété de moyens pour atteindre la flexibilité. Dans la recherche menée par Asadzadeh (2015) et Saif et al. (2019), les auteurs ont proposé des plans optimaux à court terme en considérant les objectifs suivants : minimiser le délai de production et maximiser les livraisons à temps. Georgiadis et Michaloudis (2012) ont pris en compte d'autres objectifs pour adapter le plan de production. Les plans pouvaient être adaptés en fonction du niveau d'en-cours, du niveau de stock de produits finis et du retard. L'intégration

de différentes fonctions (ordonnancement, maintenance et gestion des stocks) pour proposer différents plans à partir de la modification des paramètres du processus a été envisagée dans l'approche de Kumar et al., 2018. Rajabinasab et Mansour (2011) ont proposé des plans de production à partir de la simulation en faisant varier les paramètres de l'atelier de travail. Les modifications apportées au plan initial concernaient les machines allouées et la séquence de traitement des ordres de fabrication.

Un système de planification adaptable a été proposé par Klein et al. (2018). Le plan pouvait être adapté en fonction de la capacité disponible, des temps de fabrication et des coûts de production. De façon similaire, Ruppert et Abonyi (2018) ont conçu un algorithme qui mettait continuellement à jour le temps de cycle pour maximiser la productivité. De cette manière, ils ont fait en sorte que tous les opérateurs terminent leur travail à chaque étape du cycle.

D'autres approches visaient à sélectionner des fournisseurs pour répondre aux demandes des clients (Fang et al., 2016). Cherchant à optimiser l'accès aux fonctions d'experts, Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017) et Shamsuzzoha et al. (2016) ont proposé des approches collaboratives.

L'identification de ressources alternatives pour répondre aux demandes clients était la base des approches suivantes. Helo, Phuong et Hao (2019), Graessler et Poehler (2017) ont proposé de sélectionner et d'attribuer les ressources en analysant en temps réel les temps de fabrication, les perturbations et les compétences des opérateurs. De même, GräBler et Pöhler, (2018) ont proposé d'analyser des données de processus pour fournir les ressources, tout en anticipant les conséquences des perturbations. Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017) ont présenté une approche pour équilibrer la charge et la capacité. Leur système permettait d'augmenter la capacité des postes de charge pour compenser les conditions de surcharge et lorsque l'utilisation des ressources diminuait, les ordres de fabrication étaient complétés dès que possible. Kubo et al. (2016), Lanza, Stricker et Moser (2014), Rossit, Tohmé et Frutos (2019), Tang et al. (2017), Xu et Chen (2016), Zhou et al. (2019) et Zhu, Qiao et Cao (2017) ont proposé de générer des plans d'utilisation de ressources en temps réel. Ils cherchaient à lisser le rapport charge-capacité. Un système autonome de planification de production capable d'adapter la charge à la capacité disponible a été proposé par Kuhnle, Röhrig et Lanza (2019).

Qu et al. (2016) ont proposé une ontologie basée sur la multiplicité des étapes de production, des machines et des produits. Ils cherchaient à proposer des plans optimaux pour l'affectation des employés polyvalents aux différentes tâches.

<i>Dimension</i> <i>Références</i>	<i>Objectifs d'Agilité</i>					
	Robustesse	Résilience	Réactivité	Flexibilité	Innovation	Adaptation
(Asadzadeh, 2015)				x		
(Berger <i>et al.</i> , 2019)			x			
(Biesinger <i>et al.</i> , 2019)			x			
(Dallasega <i>et al.</i> , 2017)	x					
(Denno, Dickerson et Anne, 2018)			x			
(Engelhardt et Reinhart, 2012)			x			
(Erol et Sihm, 2017)	x					
(Fang <i>et al.</i> , 2016)				x		
(Georgiadis et Michaloudis, 2012)			x	x		
(Graessler et Poehler, 2017)				x		
(GräBler et Pöhler, 2018)			x	x		
(Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter, 2017)	x			x		
(Helo, Phuong et Hao, 2019)			x	x		
(Iannino <i>et al.</i> , 2018)			x			
(Illmer et Vielhaber, 2018)					x	
(Jiang <i>et al.</i> , 2017)			x			
(Klein <i>et al.</i> , 2018)				x		
(Kubo <i>et al.</i> , 2016)			x	x		
(Kuhnle, Röhrig et Lanza, 2019)			x	x		
(Kumar <i>et al.</i> , 2018)				x		
(Lachenmaier, Lasi et Kemper, 2017)			x	x		
(Lanza, Stricker et Peters, 2013)		x	x			
(Lanza, Stricker et Moser, 2014)			x	x		x
(Leusin <i>et al.</i> , 2018)			x			
(Li <i>et al.</i> , 2017)			x			
(Lin <i>et al.</i> , 2018)			x			
(Meyer, Hans Wortmann et Szirbik, 2011)			x			
(Mourtzis et Vlachou, 2018)			x			
(Nonaka <i>et al.</i> , 2015)			x			
(Qu <i>et al.</i> , 2016)				x		
(Rajabinasab et Mansour, 2011)				x		x
(Rossit, Tohmé et Frutos, 2019)			x	x		
(Ruppert et Abonyi, 2018)				x		
(Saif <i>et al.</i> , 2019)			x	x		
(Shamsuzzoha <i>et al.</i> , 2016)			x	x		x
(Shim, Park et Choi, 2018)			x			
(Shpilevoy <i>et al.</i> , 2013)			x			
(Tang <i>et al.</i> , 2017)			x	x		
(Um, Choi et Stroud, 2014)						x

Tableau 4 : Classification de références par dimension d'agilité – Partie 1

<i>Dimension</i> <i>Références</i>	<i>Objectifs d'Agilité</i>					
	Robustesse	Résilience	Réactivité	Flexibilité	Innovation	Adaptation
(Wandt et al. 2012)			x			
(Wang <i>et al.</i> , 2019)			x	x		
(Waschneck <i>et al.</i> , 2018)			x			
(Xu et Chen, 2016)			x	x		
(Xu et Chen, 2017)			x	x		
(Zhou <i>et al.</i> , 2019)			x	x		
(Zhu, Qiao et Cao, 2017)				x		

Tableau 5 : Classification de références par objectif d'agilité – Partie 2

#### 1.4.2.3. Adaptation

Pour donner suite à la définition adoptée de cette dimension de l'agilité, quatre approches étudiées présentaient une capacité à changer les processus et l'organisation du travail. Une proposition pour le repositionnement des ordres de fabrication dans un environnement manufacturier d'échelle globale a été présentée par Lanza, Stricker et Moser (2014). Sur la base d'une collaboration en réseau, leur approche proposait de nouveaux plans en changeant le site de production dans lequel le produit avait été initialement alloué. De la même manière, Shamsuzzoha et al. (2016) ont conçu une plateforme informatique de collaboration pour fournir de nouveaux produits dans un réseau.

Une collaboration du côté des fournisseurs a été proposée dans les travaux d'Um, Choi et Stroud (2014). Leur modèle sélectionnait parmi les fournisseurs existants celui qui disposait de la meilleure machine pour traiter une commande et qui permettait en même temps de minimiser la consommation d'énergie.

Destiné à modifier le processus de travail, le système proposé par Rajabinasab et Mansour (2011) évaluait la possibilité d'effectuer une opération sur différentes machines et aussi de fabriquer le produit avec des opérations ou une séquence d'opérations différentes.

#### 1.4.2.4. Robustesse

Trois approches étudiées présentaient cette dimension de l'agilité. Un système permettant de simplifier le flux de matières entre le chantier et l'entrepôt a été proposé par Dallasega et al. (2017). Cette approche visait à prévenir les interruptions de la construction associées à la rupture de composants. Trois objectifs supplémentaires ont été poursuivis par cette approche : la réduction de la surproduction, la minimisation des mouvements sans valeur ajoutée et la minimisation des délais de livraison des composants.

Afin de maintenir l'efficacité face aux variations de la demande, Erol et Sihm (2017) ont utilisé une méthode d'apprentissage automatique pour analyser et prévoir les changements de la demande. Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017) ont proposé des plans adaptables qui compensaient les écarts de la demande dans le court terme.

#### 1.4.2.5. Innovation

Cette dimension de l'agilité concerne la capacité à faire des choses nouvelles et à faire des choses anciennes d'une nouvelle manière. Seule une des approches étudiées a pu être classée dans cette dimension. Le modèle proposé par Illmer et Vielhaber (2018) visait à identifier la ressource qui pourrait le mieux réaliser une tâche spécifique dès la conception du produit. Dans le moyen terme, cette approche visait à prévoir les besoins capacitaires.

#### 1.4.2.6. Résilience

Parmi les approches étudiées, une seule présentait la capacité à s'adapter à une perturbation déstabilisante de l'environnement. Le modèle proposé par Lanza, Stricker et Peters (2013) était capable de proposer des solutions lorsque des perturbations externes apparaissaient, telles que des variations dans le marché et des cycles économiques courts..

### 1.4.3. Portée de l'approche de planification de production

Trois catégories ont été définies pour identifier les utilisateurs cibles de l'approche de planification de la production. Du point de vue de la taille de l'entreprise, les approches pouvaient s'appliquer aux grandes entreprises ou aux PME. Pour les approches qui n'ont pas spécifié la taille de l'entreprise, une troisième catégorie a été proposée (Non spécifiée). La figure 9 montre la répartition générale des approches par catégorie d'utilisateur. Nous présentons dans les tableaux 6 et 7 la classification détaillée de chaque approche de production par utilisateur cible.

#### 1.4.3.1. Non spécifiée

Environ 76 % des approches analysées n'ont pas précisé la taille de l'entreprise à laquelle elles s'intéressaient. Des alternatives ont conduit l'analyse de catégorie. Soit l'approche n'avait pas été validée, ou bien les auteurs n'avaient pas précisé la taille de l'entreprise.

Les approches suivantes n’avaient pas été validées : Asadzadeh (2015) ; Berger et al. (2019) ; Biesinger et al. (2019) ; Dallasega et al. (2017) ; Denno, Dickerson et Anne (2018) ; Graessler et Poehler (2017) ; Gräbler et Pöhler (2018); Lanza, Stricker et Peters (2013); Xu et Chen (2016); Xu et Chen (2017) et Zhu, Qiao et Cao, (2017).

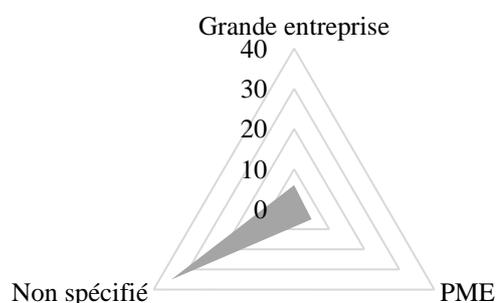


Figure 9 : Distribution des approches par taille d’entreprise

<i>Perspective</i> <i>Références</i>	<i>Taille entreprise</i>		
	Grande entreprise	PME	Non Spécifié
(Asadzadeh, 2015)			x
(Berger <i>et al.</i> , 2019)			x
(Biesinger <i>et al.</i> , 2019)			x
(Dallasega <i>et al.</i> , 2017)			x
(Denno, Dickerson et Anne, 2018)			x
(Engelhardt et Reinhart, 2012)			x
(Erol et Sihm, 2017)		x	
(Fang <i>et al.</i> , 2016)			x
(Georgiadis et Michaloudis, 2012)		x	
(Graessler et Poehler, 2017)			x
(Gräbler et Pöhler, 2018)			x
(Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter, 2017)		x	

Tableau 6 : Classification des approches par taille d’entreprise - Partie 1

<i>Perspective</i> <i>Références</i>	<i>Taille entreprise</i>		
	Grande entreprise	PME	Non Spécifié
(Helo, Phuong et Hao, 2019)			x
(Iannino <i>et al.</i> , 2018)			x
(Illmer et Vielhaber, 2018)			x
(Jiang <i>et al.</i> , 2017)			x
(Klein <i>et al.</i> , 2018)			x
(Kubo <i>et al.</i> , 2016)			x
(Kuhnle, Röhrig et Lanza, 2019)			x
(Kumar <i>et al.</i> , 2018)	x		
(Lachenmaier, Lasi et Kemper, 2017)	x		
(Lanza, Stricker et Peters, 2013)			x
(Lanza, Stricker et Moser, 2014)	x		
(Leusin <i>et al.</i> , 2018)			x
(Li <i>et al.</i> , 2017)			x
(Lin <i>et al.</i> , 2018)	x		
(Meyer, Hans Wortmann et Szirbik, 2011)			x
(Mourtzis et Vlachou, 2018)		x	
(Nonaka <i>et al.</i> , 2015)			x
(Qu <i>et al.</i> , 2016)			x
(Rajabinasab et Mansour, 2011)			x
(Rossit, Tohmé et Frutos, 2019)			x
(Ruppert et Abonyi, 2018)			x
(Saif <i>et al.</i> , 2019)			x
(Shamsuzzoha <i>et al.</i> , 2016)		x	
(Shim, Park et Choi, 2018)			x
(Shpilevoy <i>et al.</i> , 2013)	x		
(Tang <i>et al.</i> , 2017)			x
(Um, Choi et Stroud, 2014)	x		
(Wandt et al. 2012)			x
(Wang <i>et al.</i> , 2019)			x
(Waschneck <i>et al.</i> , 2018)			x
(Xu et Chen, 2016)			x
(Xu et Chen, 2017)			x
(Zhou <i>et al.</i> , 2019)			x
(Zhu, Qiao et Cao, 2017)			x

Tableau 7 : Classification des approches par taille d'entreprise - Partie 2

Leusin et al. (2018) ont testé leur système multi-agents dans une chaîne de production de fourches de transmission automobile avec 11 machines et 5 types de produits. Saif et al. (2019) ont testé leur approche heuristique dans une entreprise chinoise. L'atelier disposait de 8 postes de travail et produisait 15 références différentes de produits finis. Le modèle proposé par Fang et al. (2016) a été appliqué dans un contexte de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée avec une quantité élevée de retours.

Le reste des approches qui ont présenté une validation de cas réel ont impliqué de multiples secteurs industriels : fabrication de tôles (Helo, Phuong et Hao, 2019), revêtement d'acier (Iannino et al., 2018), lignes de production de véhicules (Illmer et Vielhaber, 2018), industrie des semi-conducteurs (Kuhnle, Röhrig et Lanza, 2019), fabrication aérospatiale (Li et al., 2017), l'industrie de fabrication de moules à haute pression (Meyer, Hans Wortmann et Szirbik, 2011), la fabrication de tuyaux en usine (Nonaka et al., 2015) et un constructeur de bateaux avec une production unique en son genre (Wandt, Friedewald et Lödding, 2012).

Un autre groupe d'approches employait des études de cas expérimentales (Jiang et al. 2017; Klein et al. 2018 ; Kubo et al. 2016 ; Qu et al. 2016 ; Rajabinasab et Mansour 2011 ; Ruppert et Abonyi 2018 ; Rossit, Tohmé et Frutos 2019 ; Shim, Park et Choi 2018 ; Tang et al. 2017 ; Wang et al.2019 ; Waschneck et al.2018 et Zhou et al. 2019).

#### 1.4.3.2. Grandes entreprises

Environ 13 % des approches étudiées ont été proposées pour de grandes entreprises. Kumar et al. (2018) ont testé leur approche dans une entreprise spécialisée dans la production de moteurs et d'ensembles de transmission. Les études de cas présentées par Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017), Lin et al. (2018) et Um, Choi et Stroud (2014), portaient sur de grands constructeurs automobiles. Lanza, Stricker et Moser (2014) ont exploité leur approche au sein d'un constructeur aéronautique. Shpilevoy et al. (2013) ont testé leur modèle dans un site de fabrication de réacteurs.

#### 1.4.3.3. PME

Cette taille d'entreprise était visée par 11 % des approches sélectionnées. Erol et Sihn (2017), Georgiadis et Michaloudis (2012) et Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017) ont testé leurs approches dans des PME du secteur de l'ingénierie. Mourtzis et Vlachou (2018) ont validé leur proposition avec un cas réel dans une PME de fabrication de moules. Shamsuzzoha et al. (2016) ont déployé leurs solutions dans trois cas réels dans différents secteurs industriels, textiles, chaussures et outils d'usinage.

#### 1.4.4. Moyens employés par les approches de planification de la production

Deux perspectives ont été proposées pour étudier les moyens employés dans l'approche de planification de la production, les groupes technologiques 4.0 et l'approche de résolution. La figure 10 montre la distribution générale des approches de planification de la production pour les technologies 4.0. Nous présentons une classification détaillée de chaque approche en fonction des technologies 4.0 employées dans les tableaux 8 et 9.

##### 1.4.4.1. Groupes technologiques 4.0

###### 1.4.4.1.1. Systèmes Cyber-Physiques (CPS)

Parmi les technologies 4.0 étudiées, les systèmes cyberphysiques étaient les plus utilisés. Georgiadis et Michaloudis (2012), GräBler et Pöhler (2018), Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017), Kubo et al., (2016), Kuhnle, Röhrig and Lanza (2019) et Mourtzis et Vlachou (2018), ont utilisé cette technologie comme outil de collecte de données du processus de production. Dans les approches de Berger et al. (2019), Biesinger et al. (2019), Klein et al. (2018), Rossit, Tohmé et Frutos (2019) et Zhu, Qiao et Cao (2017), cette technologie a été utilisée pour collecter des informations sur la position de chaque ressource, les temps de cycle de chaque poste de charge, le temps d'inactivité des ressources et le niveau de charge. Jiang et al. (2017) ont utilisé les systèmes cyberphysiques non seulement pour collecter des données, mais aussi pour effectuer des actions après la replanification.

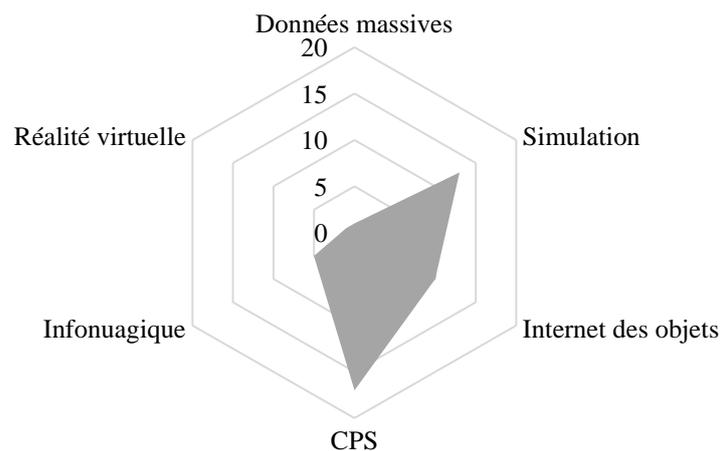


Figure 10 : Distribution des approches par groupe technologique 4.0

Dans les recherches menées par Graessler et Poehler (2017) les systèmes cyberphysiques ont été employés pour sélectionner la meilleure ressource en fonction de sa disponibilité et de sa

performance pour exécuter les tâches. Les employés interagissaient avec le CPS pour indiquer s'ils pouvaient exécuter la tâche. Un jumeau numérique vérifiait si la tâche pouvait être réalisée par l'opérateur, en fonction de sa disponibilité et de sa performance. Une fois l'opérateur sélectionné, les informations relatives à l'exécution de la tâche étaient transférées au système cyberphysiques. Cherchant à identifier la ressource nécessaire pour exécuter une tâche dès la phase de conception, Illmer et Vielhaber (2018) ont proposé d'intégrer les systèmes cyberphysiques, la modélisation et la simulation CAO.

Dans les travaux de Lanza, Stricker et Peters (2013) et Lanza, Stricker et Moser (2014), cette technologie a été utilisée pour recueillir des informations sur les perturbations en temps réel, de sorte que les processus de décision et de planification étaient alignés avec les conditions réelles du système de production.

Dans l'étude menée par Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017), les auteurs ont défini les exigences, les besoins et les possibilités d'application de la simulation dans des environnements dotés de CPS.

#### 1.4.4.1.2. Simulation

Cette technologie était la deuxième plus employée parmi les références étudiées. Environ 30 % des approches ont fait appel à la simulation. Asadzadeh (2015), Iannino et al. (2018), Rajabinasab et Mansour (2011), Qu et al. (2016) et Shpilevoy et al. (2013) ont basé leurs approches sur les systèmes multiagents. Leusin et al. (2018) ont utilisé les systèmes multiagents avec un modèle qui extrait les données de la demande d'un ERP. Rajabinasab et Mansour (2011) ont proposé un système de planification multiagents dans lequel les agents sont coordonnés par des phéromones. L'approche Waschneck et al. (2018) a combiné les systèmes multiagents et le jumeau numérique. Ce dernier a été utilisé pour que les employés puissent interagir avec le modèle.

Dallasega et al. (2017) ont utilisé les données de l'ERP et du MES (Manufacturing Execution System) comme données d'entrée de la simulation. Les informations recueillies en temps réel à partir du processus de production, des ressources et de l'inventaire des en-cours ont été utilisées dans l'approche basée sur la simulation présentée par Zhou et al. (2019).

Des modules autonomes de simulation à événements discrets ont été proposés par Denno, Dickerson et Anne (2018) et Nonaka et al. (2015). Dans l'approche de Nonaka et al. (2015), les

valeurs des paramètres de la simulation et de l'environnement de fabrication ont été comparées. Lorsqu'une mesure donnait de meilleurs résultats que les conditions de production actuelles, les paramètres de processus étaient modifiés à l'aide d'un MES Denno, Dickerson et Anne, (2018) ont proposé d'automatiser la simulation en utilisant des algorithmes génétiques et des réseaux de Petri.

Qu et al. (2016) ont présenté une approche d'apprentissage multi-agent qui cherche à proposer des plans optimaux avec des employés multi compétents. L'utilisation de la simulation a permis à Kumar et al. (2018) d'intégrer de multiples fonctions (production, maintenance et gestion des stocks) dans leur approche.

#### 1.4.4.1.3. Internet des Objets

L'IdO a été utilisé dans environ 20 % des approches étudiées. La principale raison de l'utilisation de cette technologie était d'accroître la visibilité et la traçabilité (Lin et al., 2018).

Certaines approches étaient centrées sur le produit. Meyer, Hans Wortmann et Szirbik (2011) et Saif et al. (2019) ont utilisé des produits intelligents capables d'échanger des informations avec les ressources et les systèmes d'information pour coordonner les achats, la production et l'expédition. Dans l'approche Engelhardt et Reinhart (2012), les produits (dossiers et sièges) étaient capables de communiquer le numéro de commande et des données de qualité spécifiques (comme le code de défaillance et les données de tolérance). En cas de problèmes de traitement d'une commande, le système permettait de diriger la commande vers le processus de retouches et d'accélérer son traitement. Les données relatives aux produits en fin de vie, aux produits défectueux et aux produits passant par le processus de fabrication ont été collectées par l'IdO, dans un environnement de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée par Fang et al. (2016). Ruppert et Abonyi (2018) ont mis en relation les informations sur les produits et les lignes d'assemblage.

D'autres approches ont utilisé l'IdO pour recueillir des informations sur les ressources. Dans la recherche menée par Shamsuzzoha et al. (2016), cette technologie a été utilisée pour surveiller les ressources de l'organisation partenaire. La communication en temps réel des données des ressources a permis d'optimiser les plans d'ordonnancement (Wang et al. 2019; Xu et Chen, 2016 et Xu et Chen 2017).

#### 1.4.4.1.4. Infonuagique

Seules cinq des 46 approches étudiées ont utilisé l'infonuagique comme ressource technologique. Une architecture infonuagique de type SaaS (Software as a Service) pour la planification et le contrôle intelligents de la production a été proposée par Erol et Sihn (2017). Le modèle proposé par Helo, Phuong et Hao (2019) était basé sur un service de fabrication infonuagique. Le système permettait de surveiller et de contrôler toutes les lignes de production en temps réel. Um, Choi et Stroud (2014) ont employé cette technologie pour choisir le meilleur sous-traitant pour développer un projet d'une compagnie aérienne.

Mourtzis et Vlachou (2018) et Tang et al. (2017) ont proposé des systèmes de planification à court terme intégrés dans un système cyberphysique hébergé dans le cloud.

#### 1.4.4.1.5. Données massives

L'approche de Li et al. (2017) est la seule qui a exploité cette technologie. Un grand ensemble de données contenant des informations sur le produit, les étapes de fabrication, les niveaux de stock, les postes de charge, les ressources et la structure du produit ont été exploitées comme entrée du modèle.

#### 1.4.4.1.6. Réalité virtuelle

Le modèle proposé par Wandt, Friedewald et Lödding (2012) utilisait la réalité virtuelle pour évaluer la géométrie et le positionnement de pièces d'assemblage critiques dans un environnement de construction de bateaux. Ces évaluations étaient réalisées après avoir simulé des perturbations. Si toutes les séquences d'assemblage étaient valables, le plan de production pouvait être accepté.

#### 1.4.4.2. Approche de résolution

La deuxième perspective pour étudier les moyens est l'approche de résolution. Les résultats sont présentés dans la figure 11. Nous présentons une classification détaillée de chaque approche dans les catégories de résolution dans les tableaux 8 et 9.

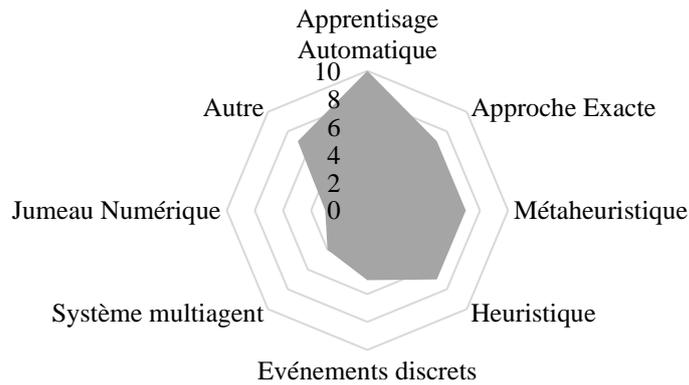


Figure 11 : Distribution des approches par méthode de solution

#### 1.4.4.2.1. Apprentissage Automatique

L'apprentissage automatique a été l'approche de résolution la plus utilisée dans les références étudiées. Dix approches sur 46 ont utilisé l'apprentissage automatique. Dans les travaux de Erol et Sihni (2017) et Kuhnle, Röhrig et Lanza (2019), les actions des agents ont été commandées par l'apprentissage de machines et l'analyse des réseaux neuronaux. Les réseaux de neurones ont également été utilisés dans l'approche d'optimisation de Zhu, Qiao et Cao (2017). Leusin et al. (2018) ont employé un agent d'apprentissage automatique qui était responsable de l'optimisation de la séquence de production. Waschneck et al. (2018) ont présenté une application de l'apprentissage de machine basée sur des algorithmes d'agents (DQN- Deep Q-Networks) pour l'ordonnancement.

Shamsuzzoha et al. (2016) ont utilisé les arbres de décision comme technique de régression. Zhou et al. (2019) ont employé l'apprentissage par renforcement pour la fabrication intelligente. Nonaka et al. (2015) ont utilisé un agent d'exploration des données pour extraire des connaissances du modèle informatique. L'objectif était de préparer l'entrée du module de simulation à événements discrets. Leur approche comportait un module statistique autonome qui paramétrait le temps total de fabrication, en fonction de la stratégie de production (stock à la commande, ingénierie à la commande). Ce module était responsable de l'extraction de données.

Dans l'approche d'ordonnancement proposée par Qu et al. (2016), un agent d'apprentissage (multi-agent approximate Q-learning) permettait de mettre à jour en temps réel le plan de

production. Ce plan était adapté aux changements du système. En effet, leur algorithme permettait de répartir la charge entre les ressources.

#### 1.4.4.2.2. Optimisation

Toutes les méthodes d'optimisation (méthodes exactes, heuristiques et métaheuristiques) qui ont été définies pour analyser l'approche de résolution ont été utilisées dans un nombre égal d'approches (sept approches pour chaque méthode d'optimisation).

##### 1.4.4.2.2.1. Méthodes exactes

Différentes méthodes de cette catégorie ont été utilisées par les approches étudiées. La méthode de programmation linéaire par nombre entier (MILP) a été utilisée par Fang et al., (2016) et Um, Choi et Stroud (2014). Iannino et al. (2018) ont utilisé la programmation linéaire. La dynamique des systèmes a été exploitée dans l'approche de Georgiadis et Michaloudis (2012).

Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter (2017) ont nommé leur approche de résolution APC (de l'anglais Autonomous Production Control). Xu et Chen (2017) ont proposé une approche de planification dynamique qui comprenait un module d'optimisation. La base de ces approches résidait dans des méthodes exactes. Li et al. (2017) ont présenté une méthode de modélisation HTN (de l'anglais Hierarchical Task Network). Ils ont employé un algorithme d'optimisation nommé (HTN-CPM) pour déterminer le nombre de pièces à produire et minimiser le retard.

##### 1.4.4.2.2.2. Métaheuristique

Quatre types différents de métaheuristiques ont été identifiés dans les approches. Des algorithmes génétiques ont été utilisés dans les approches de Asadzadeh (2015), Denno, Dickerson et Anne (2018), Helo, Phuong et Hao (2019) et Kumar et al. (2018). Dans l'approche présentée par Rajabinasab et Mansour (2011), un algorithme de colonie de fourmis a été employé. Tang et al. (2017) ont présenté un algorithme d'optimisation inspiré dans les colonies de bactéries. L'optimisation des essaims particuliers a été exploitée dans l'approche de (Wang et al., 2019).

##### 1.4.4.2.2.3. Heuristiques

Inspirées des modèles mathématiques, les approches présentées par Asadzadeh (2015) et Lanza, Stricker et Peters (2013) employaient des algorithmes de recherche locale comme approche de

résolution. Dans les recherches de Lanza, Stricker et Moser, (2014), un algorithme de type séparation et évaluation a permis de planifier la fabrication des lignes d'assemblage. L'algorithme menait des comparaisons entre les coûts de replanification des ordres de fabrication, les coûts du retard et les coûts de fabrication des produits dans d'autres sites de production.

Mourtzis et Vlachou (2018) ont présenté une nouvelle heuristique appelée ASA (de l'anglais Adaptive Scheduling Algorithm, algorithme d'ordonnancement adaptatif). Ils ont proposé de comparer l'efficacité (en termes de temps de flux moyen, d'utilisation de la capacité moyenne et de retard moyen) de leur approche de résolution avec différentes règles d'ordonnancement, comme FIFO (de l'anglais First in First Out, premier arrivé premier servi) et EDD (de l'anglais Earliest Due Date, date d'échéance la plus proche).

Dans le but de proposer des plans de production pour des horizons de planification tactique et opérationnelle, Saif et al. (2019) ont proposé une heuristique inspirée de la théorie des contraintes.

L'algorithme présenté par Ruppert et Abonyi (2018) coordonnait le temps de cycle en fonction des écarts entre le temps d'activité théorique (temps planifié) et le temps d'activité mesuré (temps réel). Shim, Park et Choi (2018) ont proposé un algorithme heuristique pour l'ordonnancement, basé sur des règles de sélection d'inventaires à cinq lots.

#### 1.4.4.2.3. Simulation

La simulation comme approche de résolution a été étudiée à travers trois méthodes, simulation à événements discrets, jumeaux numérique et systèmes multi-agents. Ces méthodes ont été employées dans un nombre similaire d'approches.

##### 1.4.4.2.3.1. Simulation à événements discrets

Dans les approches de planification présentées par Dallasega et al. (2017), Kubo et al. (2016) et Kuhnle, Röhrig et Lanza, (2019), l'analyse et le contrôle du système de fabrication étaient basés sur la dynamique des systèmes à événements discrets. Nonaka et al. (2015) ont utilisé cette technique de simulation pour soutenir la prise de décision des responsables de la planification lorsque des perturbations affectaient le processus de fabrication. De même, Wandt, Friedewald et Lödding (2012) ont employé la simulation à événements discrets pour

simuler les perturbations et leur impact dans le plan de production. Ensuite, les actions pour faire face aux perturbations étaient simulées pour évaluer si les dates de livraison des commandes et la capacité des ressources étaient respectées.

#### 1.4.4.2.3.2. Systèmes multi-agents

Des systèmes multi-agents ont été employés dans quatre approches sur 46. Dans la recherche menée par Jiang et al. (2017), la négociation entre agents était fondée sur la maximisation de la qualité et la minimisation des coûts (à savoir, coûts de traitement et du retard). Klein et al. (2018) ont associé un agent à chaque étape du processus de production. Les agents pouvaient participer à des actions et des négociations en temps réel basé sur le coût de production, le temps de fabrication et l'émission de CO2.

Dans l'approche de Meyer, Hans Wortmann et Szirbik (2011), un agent était affecté à chaque produit. En outre, des agents ont été affectés à chacune des activités suivantes : achat, expédition, production et vente.

<i>Dimension</i>	<b>Groupe technologique 4.0</b>						<b>Approche de résolution</b>							
	<i>Données Massives</i>	<i>Simulation</i>	<i>IdO</i>	<i>CPS</i>	<i>Cloud Comp.</i>	<i>Réalité virtuelle</i>	<i>App. Auto</i>	<i>Méthodes Exact</i>	<i>Meta-heuristique</i>	<i>Heuristique</i>	<i>SED</i>	<i>Sys.Multi Agent</i>	<i>Jumeau num.</i>	<i>Autre</i>
<b>Références</b>														
(Asadzadeh, 2015)	x						x		x	x				
(Berger <i>et al.</i> , 2019)				x									x	
(Biesinger <i>et al.</i> , 2019)				x									x	
(Dallasega <i>et al.</i> , 2017)	x										x			
(Denno, Dickerson et Anne, 2018)	x								x					
(Engelhardt et Reinhart, 2012)			x											x
(Erol et Sihm, 2017)					x		x							
(Fang <i>et al.</i> , 2016)			x						x					
(Georgiadis et Michaloudis, 2012)														
(Graessler et Poehler, 2017)				x									x	
(GräBler et Pöhler, 2018)				x										x

Tableau 8 : Classification des approches par moyens – Partie 1

Dimension	Groupe technologique 4.0						Approche de résolution					
	Données Massives	Simulation	IdO	CPS	Cloud Comp.	Réalité virtuelle	App. Auto	Méthodes Exact	Meta-heuristiq.	Heuristiq ue	SED	Sys.Multi Jumeau num.
Références												
(Grundstein, Freitag et Scholz-Reiter, 2017)				x				x				
(Helo, Phuong et Hao, 2019)					x				x			
(Iannino <i>et al.</i> , 2018)		x						x				
(Illmer et Vielhaber, 2018)				x								
(Jiang <i>et al.</i> , 2017)				x								x
(Klein <i>et al.</i> , 2018)				x								x
(Kubo <i>et al.</i> , 2016)				x							x	
(Kuhnle, Röhrig et Lanza, 2019)				x			x				x	
(Kumar <i>et al.</i> , 2018)		x							x			
(Lachenmaier, Lasi et Kemper, 2017)				x								
(Lanza, Stricker et Peters, 2013)				x					x			
(Lanza, Stricker et Moser, 2014)				x					x			
(Leusin <i>et al.</i> , 2018)		x					x					
(Li <i>et al.</i> , 2017)	x							x				
(Lin <i>et al.</i> , 2018)			x									
(Meyer, Hans Wortmann et Szirbik, 2011)			x									x
(Mourtzis et Vlachou, 2018)				x	x				x			
(Nonaka <i>et al.</i> , 2015)		x					x				x	
(Qu <i>et al.</i> , 2016)		x					x					
(Rajabinasab et Mansour, 2011)		x							x			
(Rossit, Tohmé et Frutos, 2019)				x								
(Ruppert et Abonyi, 2018)			x						x			
(Saif <i>et al.</i> , 2019)			x						x			
(Shamsuzzoha <i>et al.</i> , 2016)			x				x					
(Shim, Park et Choi, 2018)		x							x			
(Shpilevoy <i>et al.</i> , 2013)		x										x
(Tang <i>et al.</i> , 2017)					x							
(Um, Choi et Stroud, 2014)					x			x				
(Wandt <i>et al.</i> 2012)						x					x	
(Wang <i>et al.</i> , 2019)			x									
(Waschneck <i>et al.</i> , 2018)		x						x				
(Xu et Chen, 2016)			x									
(Xu et Chen, 2017)			x					x				
(Zhou <i>et al.</i> , 2019)		x						x				
(Zhu, Qiao et Cao, 2017)				x				x				

Tableau 9 : Classification des approches par moyens – Partie 2

Un système multi-agent qui soutient la gestion des ressources dans un contexte d'usine intelligente a été présenté par Shpilevoy et al. (2013). Les négociations entre agents considéraient les priorités de traitement des ordres de fabrication, la structure du produit, les processus technologiques, les différences de capacité entre les machines et entre les employés, la séquence des opérations et les temps de fabrication.

#### 1.4.4.2.3.3. Jumeau numérique

Le jumeau numérique a été utilisé dans trois approches. Berger et al. (2019) ont utilisé cette technique pour simuler des pannes machines et des processus de maintenance plus longs ou imprévus.

Un jumeau numérique automatisé a été présenté dans la recherche menée par Biesinger et al. (2019). Les auteurs avaient l'intention de réduire les écarts existants entre le processus de production et le plan de production.

Cherchant à impliquer les employés dans la planification à court terme, Graessler et Poehler (2017) ont développé un jumeau numérique qui permettait la communication des employés avec le système de production via un système cyberphysique.

#### 1.4.4.2.4. Autres

Une catégorie supplémentaire a été créée pour rassembler les approches de planification de la production qui n'exploitaient pas de techniques de résolution mentionnées précédemment.

Les approches présentées par Illmer et Vielhaber (2018) et Lachenmaier, Lasi et Kemper (2017) utilisaient la simulation comme approche de résolution, mais il n'a pas été possible de les classer dans les techniques de simulation étudiées.

Une approche d'optimisation inverse a été utilisée par Rossit, Tohmé et Frutos (2019). À partir d'un plan initial, le processus d'optimisation visait à trouver les valeurs des paramètres qui permettaient de générer ce plan. Xu et Chen (2016) ont présenté une approche d'optimisation, mais il n'a pas été possible d'identifier la catégorie.

Engelhardt et Reinhart (2012) ont présenté une méthodologie pour mettre en œuvre l'utilisation de l'IdO et la collecte de données en temps réel pour la planification de la production. Gräbler et Pöhler, (2018) ont proposé une méthodologie pour la mise en œuvre de l'intelligence

informatique dans l'exécution d'un processus de fabrication. Pour aucune des deux méthodologies précédentes, des approches de résolution n'ont été présentées.

Un système de synchronisation automatique, entre l'IdO et des techniques de planification avancées, a été proposé par Lin et al. (2018). Cette synchronisation a été développée dans RAPShell.

## 1.5. Synthèse de l'État de l'Art

Les résultats de la caractérisation des approches de planification de la production, du point de vue de l'activité de planification, montrent une grande disparité (voir figure 6). La détermination de la disponibilité des ressources requises est l'activité de planification de la production privilégiée des chercheurs. Ce résultat est aligné avec celui de la dimension de l'agilité qui a présenté le plus grand nombre d'approches : la réactivité (voir figure 8). Les nouvelles approches de planification de la production cherchent à détecter les perturbations et à réagir dans un délai court en proposant des plans de production adaptables.

Très peu d'approches ont cherché à définir les quantités à produire par période. Cela pourrait être surprenant, car il a été démontré que, lors de la quatrième révolution industrielle, la demande se caractérise par de grandes variations et des exigences élevées en matière de respect des délais de livraison (Autenrieth et al., 2018 ; Jiang et al. 2017 ; Lanza, Stricker et Moser 2014 ; Sousa et al. 2018 ; Wang et al.2019). Le nombre de recherches ayant proposé des solutions pour préciser les niveaux de stock et définir les ressources nécessaires était réduit.

La revue de la littérature a révélé que les approches de planification de la production 4.0 ont une préférence pour le niveau de planification opérationnel (voir figure 7). Ce résultat est tout à fait cohérent avec les dimensions de l'agilité principalement visées par les chercheurs. Les deux dimensions de l'agilité qui sont au cœur des approches de planification de la production étudiées, la réactivité et la flexibilité ont été mises en relation par Pellerin (2018) avec les horizons à court terme. Peu d'approches ont proposé d'intégrer plusieurs niveaux de planification dans la même solution.

Quant à l'agilité, les résultats des dimensions étudiées prouvent que les approches de planification de la production lors de la quatrième révolution industrielle recherchent une certaine amélioration de l'agilité. Cependant, il existe une grande disparité entre le nombre d'approches par dimension de l'agilité (voir figure 8). La réactivité est la dimension la plus

ciblée par les approches de planification de la production. Les chercheurs proposent des systèmes qui s'adaptent en temps réel aux conditions internes et externes de l'environnement de production. Sans grande différence, la flexibilité est la deuxième dimension la plus ciblée par les approches étudiées. En effet, les chercheurs emploient plusieurs moyens pour mieux planifier la production à court terme.

Moins d'approches ont proposé des solutions visant l'adaptation et la robustesse. La recherche dans ces dimensions d'agilité cherche la collaboration industrielle pour la sélection des fournisseurs et la sélection des sites de production. Ces approches ont également cherché à fournir des moyens pour faire face aux variations de la demande.

La résilience et l'innovation ne semblent pas être une priorité des approches de planification de la production étudiées. Ces deux dimensions de l'agilité ont été associées aux horizons de long et moyen terme par Pellerin (2018). En fait, les niveaux de planification tactique et stratégique ne sont pas au cœur des approches étudiées.

Les résultats de la portée des approches de planification de la production ont prouvé qu'il est indispensable de les associer à des tailles d'entreprises spécifiques. La plupart des approches étudiées ne précisent pas le champ d'application (voir figure 9). Moeuf et al. (2018) ont montré que les PME ont une structure organisationnelle et managériale complètement différente de celle des grandes entreprises. Ils ont précisé que les PME manquent de fonctions de support et que, par rapport aux grandes entreprises, elles présentent une productivité plus faible, des coûts plus élevés et des délais de livraison plus courts.

De plus, il serait important pour les chercheurs de valider les approches de planification dans des scénarios de production réels. De nombreuses approches présentent une validation expérimentale. Une application de ces approches dans des environnements de production réels pourrait encourager la diffusion des connaissances.

Les résultats de l'analyse des moyens employés par les approches ont montré que l'utilisation des groupes technologies 4.0 n'est pas uniforme (voir figure 10). Les technologies les plus utilisées par les approches de planification de la production sont les systèmes cyberphysiques et la simulation. L'analyse de la littérature n'a pas révélé de nombreuses utilisations des données massives ni de la réalité virtuelle en tant que technologies. Des recherches sont encore nécessaires pour rendre ces technologies plus utiles dans le cadre de la planification de la production.

Les approches ayant abordé la définition de la disponibilité des ressources ont principalement utilisé les systèmes cyberphysiques. Les résultats ont également montré que l'infonuagique a été exploitée dans le cadre de cette activité. Le calcul des niveaux d'inventaire est l'activité dans laquelle les chercheurs ont effectué un choix de technologies plus divers. Au moins un cas d'utilisation par groupe technologique (à l'exception de données massives) a été trouvé dans la revue de la littérature.

La simulation et l'IdO, ont présenté au moins une application dans chacune des activités de planification de la production, à l'exception de la définition des ressources requises. Pour cette activité, les chercheurs ont employé dans la plupart des cas les systèmes cyberphysiques. Le seul cas qui a été rapporté sur l'utilisation des données massives portait sur la définition des niveaux de demande.

En ce qui concerne l'autre catégorie de moyens, l'approche de la résolution, les résultats de la figure 10 montrent que les approches de planification de la production étudiées utilisent principalement l'IA et toutes les méthodes d'optimisation (exactes, métaheuristiques et heuristiques). La simulation comme approche de résolution n'est pas dans les préférences des chercheurs.

L'IA, les métaheuristiques et les heuristiques sont davantage employées pour la détermination de la disponibilité des ressources. Les méthodes exactes ont présenté un nombre égal d'applications pour la définition des niveaux de demande, la précision des niveaux de stocks et la détermination de la disponibilité des ressources. La simulation par événements discrets a été utilisée comme approche de résolution de toutes les activités de planification de la production étudiées. Le jumeau numérique a été employé uniquement dans les approches portant sur la définition de la disponibilité des ressources. Les systèmes multi-agents ont été utilisés dans des approches de toutes les activités de planification, sauf dans celles concernant la définition des ressources nécessaires.

Parmi les références sélectionnées, nous n'avons trouvé aucun cas d'exploitation de l'intelligence artificielle comme approche de résolution pour la précision des niveaux d'inventaire ni pour la définition des ressources nécessaires. De même, les heuristiques n'ont pas été employées comme moyen de résolution de ces deux activités.

Une analyse des groupes technologiques 4.0 et des méthodes de résolution a permis de préciser que dans les approches de planification de la production 4.0, l'intelligence artificielle est

principalement utilisée avec la simulation (technologie 4.0). Il semble y avoir peu d'approches de planification de la production qui utilisent l'intelligence artificielle lorsque l'Internet des objets, les systèmes cyberphysiques et l'infonuagique sont les technologies choisies.

En ce qui concerne l'optimisation, les méthodes exactes sont les seules qui ont été utilisées avec tous les groupes technologiques 4.0 analysés. Les métaheuristiques ont été appliquées avec la simulation (technologie 4.0), l'IdO et l'infonuagique. Les heuristiques ont présenté au moins un cas d'application avec chaque technologie, à l'exception de données massives.

Pour les techniques de simulation, les approches de planification ont proposé d'utiliser la simulation par événements discrets avec les systèmes cyberphysiques et la simulation comme technologie 4.0. Les systèmes multi-agents ont présenté une application avec ces deux dernières technologies et également avec l'IdO. Le jumeau numérique a seulement été exploité avec les systèmes cyberphysiques.

Nous analysons à présent les dimensions de l'agilité avec les groupes technologiques 4.0. Les approches qui ont utilisé les systèmes cyberphysiques ont principalement recherché la réactivité et la flexibilité. De même, ces deux dimensions de l'agilité ont été ciblées lors de l'utilisation de la simulation et de l'IdO. Il semble y avoir peu d'approches qui utilisent l'infonuagique lorsque la robustesse et l'adaptation sont les objectifs visés. Les deux cas d'utilisation des données massives et de réalité virtuelle ont recherché la réactivité.

En ce qui concerne la robustesse, une grande disparité dans l'utilisation des technologies a été constatée. Un seul cas d'utilisation de chacune des technologies suivantes, la simulation, l'IdO, les systèmes cyberphysiques et l'infonuagique, a été trouvé. De même, lorsque l'adaptation était la cible, un seul cas d'utilisation de chaque technologie, à l'exception des données massives, a été trouvé. Les seuls cas portant sur la résilience et l'innovation ont utilisé les systèmes cyberphysiques.

Dans les quelques cas ayant abordé les grandes entreprises, les approches avaient comme objectifs d'agilité, la réactivité, l'innovation et/ou l'adaptation. Ces objectifs étaient également visés par les approches dirigées vers les PME. Deux approches qui cherchaient la robustesse ont été trouvées pour cette taille d'entreprise.

Enfin, en prenant en considération l'activité de planification de la production et les dimensions de l'agilité, nous avons constaté que les approches qui ont cherché à définir les niveaux de

demande visaient principalement la réactivité. La flexibilité était le deuxième objectif le plus ciblé. La résilience et l'innovation ont rarement été ciblées par cette activité de planification.

Les approches qui portaient sur la précision des niveaux d'inventaire ont présenté la flexibilité comme l'objectif principal. La réactivité a occupé la deuxième position parmi les objectifs. Un seul cas visant la robustesse et un autre portant sur l'adaptation ont été trouvés.

Les recherches qui ont proposé des approches pour la détermination des ressources nécessaires visaient la réactivité et la flexibilité à parts égales. La seule approche qui a fait de l'innovation la principale dimension de l'agilité s'est intéressée à cette activité.

Dans les approches qui cherchaient à déterminer la disponibilité des ressources nécessaires, la réactivité était l'objectif le plus ciblé. Sans différence significative, la flexibilité était la deuxième dimension de l'agilité visée par ces approches. Un petit nombre de cas concernant cette activité recherchaient la robustesse, l'adaptation et la résilience. Aucune approche abordant la détermination de la disponibilité de ressources n'a cherché l'innovation.

## 1.6. Conclusions

Ce chapitre nous a permis de caractériser les approches de planification de la production dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Une analyse des données (effectuée à l'aide du logiciel VOSviewer), fondée sur la relation entre la planification de la production et les groupes technologiques 4.0, nous a permis de définir les chaînes de recherche que nous avons exploitées dans la revue de la littérature. Nous avons proposé un nouveau cadre d'analyse des approches de planification de la production fondée sur cinq perspectives : activité de planification, horizon de planification, dimension de l'agilité, portée et moyens. Ce cadre pourrait être applicable à d'autres travaux visant à analyser différentes activités de planification de la production.

La revue de la littérature nous a permis d'identifier 46 approches de planification de la production qui utilisent l'une des technologies 4.0 suivantes : données massives, simulation, IdO, systèmes cyberphysiques, infonuagiques ou réalité virtuelle. Cette recherche a révélé que les approches de planification de la production 4.0 visent principalement à déterminer la disponibilité des ressources pour des horizons de planification à court terme. Nous avons également montré que les systèmes cyberphysiques, la simulation et l'IdO sont les technologies les plus exploitées pour les approches de planification. Ces trois groupes technologiques

représentent environ 30 % des outils et technologies qui ont été identifiés comme piliers de l'industrie 4.0.

Cette recherche a également montré qu'il existe de multiples façons de combiner les groupes technologiques et les approches de résolution pour atteindre les différentes dimensions de l'agilité dans la planification de la production.

Cependant, l'étude a permis d'identifier des lacunes dans la planification de la production 4.0. En effet, il y a peu d'approches qui abordent la résilience, l'innovation, la robustesse et l'adaptation. En outre, peu de recherches ont spécifié la taille d'entreprises à laquelle elles s'intéressaient. Enfin, il y a peu d'approches de planification de la production appliquées aux PME et à la recherche de l'agilité comme l'un des piliers de la quatrième révolution industrielle. En conséquence, nous n'avons pas d'idée précise sur l'application des groupes technologiques 4.0 ni sur les approches de résolution qui devraient être déployées pour rendre les activités de planification de la production, à différents horizons, plus agiles dans les PME. Ainsi, notre objectif général de recherche est de proposer *une approche agile pour la planification de la production à moyen terme pour les PME manufacturières*.

Par ailleurs, il existe un grand nombre d'approches qui n'ont pas été appliquées dans un contexte industriel réel. Environ 50 % des approches étudiées (22 sur 46) n'ont pas présenté d'application dans l'industrie. Il serait important de mettre en œuvre ces propositions dans des cas industriels réels pour assurer le partage de connaissances. Enfin, l'intelligence artificielle a été étudiée ici comme une approche à résolution unique. Une extension de cette perspective sur les multiples méthodes qu'elle comporte serait pertinente.

Sur le point méthodologique, cette revue de littérature a quelques limites. La sélection des références a été effectuée sur la base des quatre activités générales de planification de la production : la définition des niveaux de demande, la précision des niveaux de stock, la définition des ressources nécessaires et la détermination de la disponibilité des ressources. Une description plus détaillée de ces activités peut certainement influencer le nombre de références sélectionnées.

Des recherches supplémentaires devraient être menées pour déterminer si les approches de planification de la production de la quatrième révolution industrielle visent d'autres objectifs que celui de l'agilité. La définition du processus de mise en œuvre des technologies 4.0 dans les processus de planification de la production doit être étudiée plus en détail.

# Chapitre 2 : Méthodologie de Recherche

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la méthodologie que nous proposons pour développer notre travail de recherche. Nous présentons d'abord la question de recherche. Nous détaillons ensuite l'objectif général et les objectifs spécifiques que nous avons proposés. Dans une deuxième partie, nous présentons brièvement notre partenaire industriel qui nous a ouvert ses portes pour mener ces travaux de recherche. Finalement, nous décrivons le plan de mise en œuvre qui nous a permis d'atteindre les objectifs de recherche.

## 2.2. Questions de recherche et objectifs

L'objectif principal de cette thèse est de développer une approche pour la planification de la production à moyen terme dans un contexte industriel de PME manufacturière à l'ère de l'industrie 4.0. Cet objectif principal vise à répondre à la question suivante :

- Comment rendre agile le processus PDP au sein des PME manufacturières ?

Nous avons défini quatre objectifs spécifiques afin d'atteindre l'objectif général :

- identifier les approches de planification de la production les plus adaptées au contexte industriel des PME pour le processus PDP ;
- caractériser le besoin de notre partenaire industriel lié au processus de planification de la production à moyen terme ;
- proposer un modèle d'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP des PME manufacturières; et
- concevoir une approche d'optimisation comme outil de support pour la prise de décisions du chef planificateur dans le processus PDP des PME manufacturières.

Nous tenons à présent à décrire brièvement les activités que nous proposons pour aborder chacun des objectifs spécifiques. Dans le but d'identifier les approches de planification de la

production les plus adaptées au contexte industriel des PME pour le processus PDP, nous proposons de mener une Revue de la littérature pour caractériser les approches de planification de la production dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Ensuite, nous chercherons à identifier la portée et les moyens employés par ces approches.

Dans un deuxième temps, pour caractériser le besoin de notre partenaire industriel associé à la planification de la production à moyen terme nous proposons d'abord de caractériser le processus actuel du PDP au sein du groupe Exxelia. Après, nous chercherons à caractériser le processus de prise de décision associé au processus PDP. Finalement, nous conduirons une analyse des éléments précédents pour identifier les difficultés et opportunités d'amélioration du processus PDP.

Dans un troisième temps, pour proposer un modèle d'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP nous proposons d'abord de modéliser le processus PDP classique. Postérieurement, nous cherchons à sélectionner les activités susceptibles d'être améliorées par le numérique. Après avoir défini le niveau du PDP 4.0 (surveillance, contrôle, optimisation, autonomie), nous chercherons à identifier les dimensions de l'agilité apportées par le numérique.

Dans un dernier temps, pour concevoir l'approche d'optimisation dirigée à supporter la prise de décisions du gestionnaire de planification PDP, nous allons commencer par déterminer les objectifs de l'approche. Ensuite, il sera nécessaire de déterminer le secteur de production d'étude. Ceci nous conduira à déterminer les paramètres cibles et les hypothèses du modèle. A ce point notre objectif sera de tester l'approche et de valider les résultats obtenus avec celui-ci. Nous pourrions ainsi apporter des améliorations au modèle et l'optimisation en fonction du temps de calcul et de la performance de ces propositions.

### 2.3. Ancrage industriel

Les présents travaux de recherche découlent d'une demande émise par le partenaire industriel Exxelia. Cette thèse a été financée par un partenariat académique-industriel entre AMVALOR et Exxelia.

Exxelia, société fondée en 1965, est un concepteur et fabricant de solutions électroniques et électromagnétiques performantes et innovantes. Le groupe travaille dans des secteurs à hautes

exigences comme l'aéronautique, le spatial, la défense et le médical notamment. Lors des 15 dernières années, le groupe a connu une croissance externe importante visant à intégrer des PME avec un savoir-faire et une expertise importante. Aujourd'hui, Exxelia est constitué d'un agrégat de 13 PME (4 aux États unis, 6 en France, 2 au Maroc, 1 au Vietnam) regroupées sous forme de Global Business Unit par type de produit : assemblage électromécanique, condensateurs et composants magnétiques. Les travaux de cette thèse ont été développés dans le site industriel de Chanteloup-en-Brie (77).

Depuis 2017, le groupe Exxelia est dans une démarche d'homogénéisation de processus sur la base d'un ERP unique et commun à l'ensemble des entités. Les travaux de cette recherche sont en relation avec ce projet, car il cherche de façon parallèle à homogénéiser les processus et pratiques des différents départements du groupe. Parmi ces processus, les activités de planification de la production sont au cœur de l'activité du nouveau département Supply Chain.

La création du département Supply Chain a entraîné l'apparition de nouvelles fonctions telles que le Chef planificateur, responsable de la planification dans un horizon moyen terme (niveau de planification tactique). Le PDP est au centre de l'activité du Chef planificateur. Le PDP, au sein du groupe, cherche dans un premier temps à fiabiliser les délais promis aux clients. Dans un second temps, le PDP a comme objectif d'optimiser l'utilisation de la capacité des ressources et le niveau de stocks de matières premières.

## 2.4. Plan de mise en œuvre

Une méthodologie en quatre phases a été définie pour atteindre les objectifs de ce projet de recherche. Dans un premier temps, nous avons conduit une analyse des approches de planification de la production. Une revue de la littérature et la proposition d'un cadre d'analyse visant à identifier les approches de planification de la production le plus adaptables au contexte industriel des PME nous ont permis de préciser la problématique de recherche. Cette phase de recherche bibliographique a abouti à trois publications dans des conférences internationales (Tobón Valencia et al., 2018; Tobón Valencia et al., 2019 a et b). Les publications portaient sur les sujets d'intégration des systèmes d'information et caractérisation d'approches de planification de la production dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. La rédaction du premier chapitre de cette thèse, postérieure à la publication des articles précédents, constitue la contribution principale de cette première étape de recherche.

Lors de la première année, nous avons accompagné l'exécution des tâches opérationnelles au sein du département Supply Chain du partenaire industriel. Ceci nous a permis de prendre connaissance de la culture de l'entreprise et de ses modes de fonctionnement.

Suite à la phase d'étude de la littérature, nous avons conduit une étude Delphi-Régnier au sein du groupe industriel dans le but de répondre au deuxième objectif spécifique. Cette étude nous a permis dans un premier temps de caractériser le processus PDP au sein du groupe. Dans un second temps nous avons pu préciser le besoin industriel à travers l'identification des difficultés et opportunités d'amélioration des processus de planification à moyen terme.

Dans un troisième temps, notre objectif était de proposer un modèle d'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP. Nous avons employé le standard BPMN 2.0 pour modéliser les processus. Nous avons commencé par modéliser le processus PDP de notre partenaire industriel. Nous avons ensuite modélisé un processus PDP mature pour sélectionner les activités sensibles d'être améliorées par le numérique. A ce point nous avons collaboré avec un groupe d'experts pour sélectionner les groupes technologiques 4.0 à intégrer dans le processus PDP. Nous présentons dans le quatrième chapitre de cette thèse les travaux de cette phase.

La quatrième phase concerne la conception, la validation et l'amélioration d'un modèle d'exploitation de données visant à supporter la prise de décisions du Chef planificateur dans le processus PDP. Le premier et second tour de l'étude Delphi nous a permis de préciser les paramètres cibles ainsi que le secteur d'étude et l'envergure du modèle.

La première version du modèle considérait les contraintes de fabrication des quantités demandées par les clients. Il assurait l'équilibre charge-capacité dans les postes de charge critiques et respectait le séquençement des opérations dans un système de fabrication en flux continu. Le fait d'avoir considéré un système en flux continu nous a permis de simplifier la modélisation du problème. Cependant, ce modèle ne respectait pas les contraintes de fabrication par lots employées par l'entreprise. En conséquence, nous avons développé une deuxième version considérant la fabrication par lots. Dans cette version nous avons employé une méthode d'optimisation exacte pour minimiser le retard. Nous avons comparé les résultats de cette deuxième version avec les valeurs du retard réel. Cette deuxième version du modèle s'avère performante pour la minimisation du retard. Néanmoins, le temps de calcul étant élevé ne nous

a pas permis de retrouver des solutions optimales dans un temps raisonnable. Par conséquent, nous avons conçu une troisième version. Avec cette version nous cherchions à diminuer le temps de calcul et à retrouver des solutions faisables et conformes aux besoins industriels. Nous avons ainsi porté des changements dans l'approche de résolution.

La première version de l'approche d'optimisation a été publiée dans une conférence internationale (Tobón Valencia, *et al.*, 2019c). La deuxième et troisième version de l'approche est présentée dans le cinquième et sixième chapitre de ce manuscrit.

La figure 12 synthétise le plan de mise en œuvre décrit précédemment.

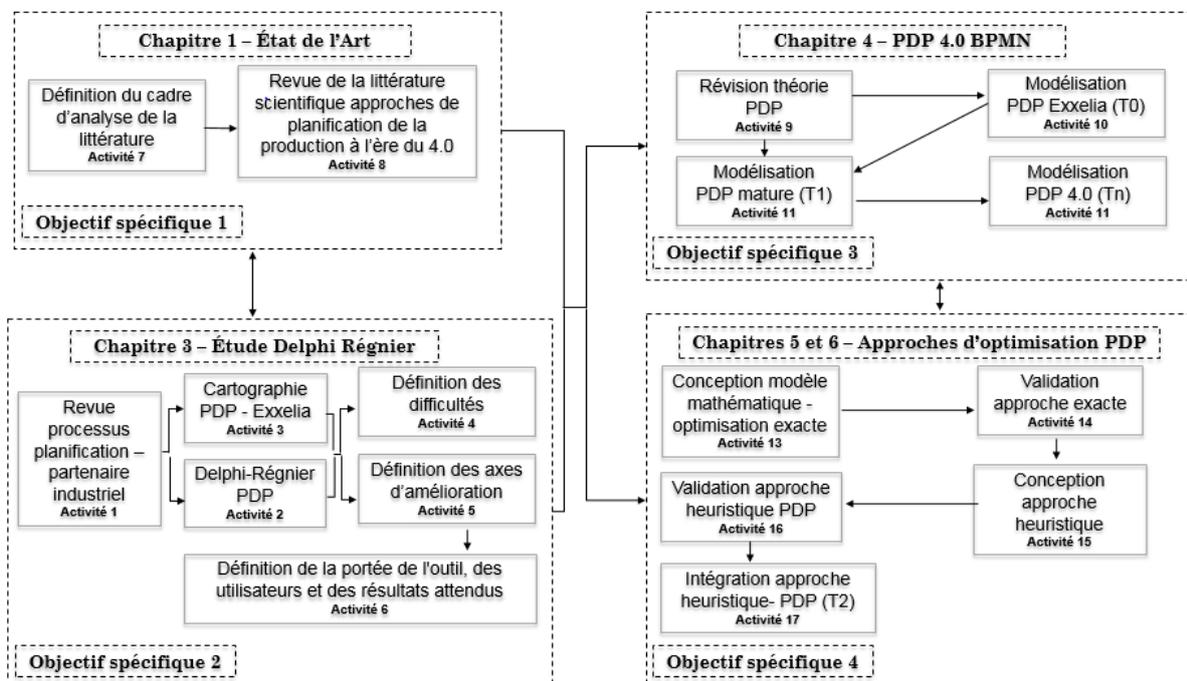


Figure 12 : Plan de mise en œuvre du projet de doctorat

## 2.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la méthodologie proposée pour atteindre l'objectif général de cette thèse. Nous avons présenté dans le premier chapitre une revue de la littérature portant sur les approches de planification de la production 4.0. Nous avons identifié les approches les plus adaptées au contexte industriel des PME pour la planification de la production à moyen terme.

Dans les chapitres suivants, nous présentons les résultats et la démarche suivie pour atteindre le deuxième et troisième objectif spécifique. Dans le Chapitre 3, nous présentons les résultats de l'étude Delphi Régnier que nous avons conduite au sein de l'entreprise pour préciser le besoin industriel. Ensuite, dans les Chapitres 4 et 5 nous présentons les modèles de support à la prise de décisions ainsi que les tests que nous avons conduits pour valider ces modèles.

## Chapitre 3 : Étude Delphi Régnier

### 3.1. Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons caractérisé les approches de planification de la production à l'ère de la quatrième révolution industrielle. L'état de l'art a montré qu'il y a peu de cas dans la littérature scientifique destinés à la planification de la production à moyen terme. Il apparaît que les cas d'application réels de ces approches sont très limités et que les auteurs spécifient rarement la taille des entreprises pour laquelle l'approche a été conçue. Les approches pour lesquelles la portée a été précisée sont adaptées à des contextes industriels spécifiques.

En conséquence, nous avons décidé de concevoir une solution adaptée au contexte industriel des PME manufacturières avec plusieurs lignes de production, fabrication principalement artisanale et par lots (batch production system), un grand portefeuille de produits et une stratégie de production de fabrication sur commande.

Dans le but de déterminer le besoin industriel en matière de processus de planification de la production à moyen terme, nous avons jugé nécessaire de caractériser d'abord le processus actuel du PDP au sein du groupe industriel. Il était nécessaire également de caractériser le processus de prise de décision associé au processus PDP. En s'appuyant sur les résultats des caractérisations précédentes, nous avons considéré qu'il serait possible d'identifier des difficultés et les opportunités d'amélioration du processus PDP. L'intérêt ultime était de proposer une solution adaptée au besoin industriel pour améliorer le processus de planification à moyen terme.

Une revue de la littérature portant sur la caractérisation du processus de planification à moyen terme au sein des PME a été conduite. Cette revue de la littérature nous a permis de déterminer qu'il n'existe pas d'approche scientifique permettant de caractériser ces processus. Mener une enquête de terrain nous permettrait d'avoir une idée des approches de planification dans différents secteurs industriels. Cependant, nous ne parviendrions pas à identifier le besoin de notre partenaire industriel.

À ce stade, nous avons jugé pertinent d'interviewer les différentes parties prenantes du PDP au sein du groupe Exxelia. Nous avons utilisé la méthode de Delphi via les abaques de Régnier.

Ce chapitre présente l'étude que nous avons menée pour caractériser le processus PDP de notre partenaire industriel. Dans la première section du chapitre, nous présentons la technique Delphi et les Abaques de Régnier. Nous décrivons ensuite l'organisation de l'étude. Finalement, nous synthétisons l'opinion de différentes parties prenantes par rapport aux pratiques de planification actuelles.

### 3.2. Technique Delphi

Cette technique permet de parvenir à un consensus de groupe sur la base de l'avis des experts (Windle, 2004 ; Gordon and Hermer, 1964). Les consensus permettent de déterminer, prévoir et explorer les besoins et les priorités d'un sujet spécifique (Windle, 2004). La technique est fondée sur une discussion ouverte et anonyme qui réduit de manière significative l'effet de la persuasion, la difficulté d'exprimer ses propres opinions en public et l'effet de l'opinion majoritaire (Gordon and Hermer, 1964).

Les origines de la méthode Delphi sont liées aux projets militaires. Elle a été utilisée après la Seconde Guerre mondiale (1950) par Kaplan qui cherchait à recueillir l'avis d'experts sur les prévisions sociales et technologiques dans le cadre de l'élaboration des politiques de la RAND Corporation (Loo, 2002 ; Windle, 2004).

Après sa première utilisation, la méthode a été employée dans de multiples disciplines et organisations, à savoir le progrès technologique, l'industrie, la gestion et le management (Maleki, 2009).

Le nom de la méthode a été emprunté à la mythologie grecque. L'oracle de Delphes avait le pouvoir de visualiser l'avenir, de sorte que les actions et les décisions pouvaient être traitées correctement à l'avance.

Cette méthode permet de recueillir des informations sur des problèmes complexes. Après une série d'itérations, l'objectif est de parvenir à un consensus et de fixer les orientations futures. (Loo, 2002) propose six caractéristiques principales pour assurer le succès de la méthode :

- Le groupe d'experts doit représenter un large spectre d'opinions sur le sujet étudié ;

- Les participants restent anonymes. (Keeney, Hasson et McKenna, 2001) estiment que l'anonymat garantit aux participants une chance égale de présenter et de réagir à des idées non biaisées par l'identité des autres participants L'anonymat et l'indépendance sont les principes fondamentaux de cette méthode ( (Maleki, 2009) et(Gordon and Hermer, 1964)) ;
- L'équipe de recherche, également appelée « modérateur », est chargée de créer des questionnaires et des rapports de retour d'information pour le groupe d'experts pendant le développement de l'étude ;
- Le processus s'appuie sur un retour d'information itératif (Windle, 2004). Les questionnaires et les retours d'information sont créés au cours de plusieurs tours. Windle (2004) et Kenney et al. (2001), notent que la proposition de différents questionnaires doit être portée jusqu'à ce que l'équipe de recherche obtienne une convergence d'opinion. Néanmoins, ils conseillent de faire attention à ne pas écarter des conclusions lorsqu'elles n'obéissent pas au consensus général ;
- Keeney, et al. (2001) soulignent que le Delphi classique employait quatre cycles. Cependant, il est difficile de maintenir un taux de réponse élevé avec de nombreux cycles. En fait, le dernier cycle d'une étude Delphi est caractérisé par un faible taux de réponse. Par conséquent, le nombre de cycles est souvent réduit à deux ou trois ; et
- L'étude se termine par un rapport qui comporte les résultats, les forces, les faiblesses et les plans d'action pour la mise en œuvre du programme. Keeney et al. (2001) considèrent qu'un consensus issu d'une étude Delphi ne signifie pas que la question qui a fait l'objet de l'étude a reçu une réponse correcte.

D'après Loo (2002), la méthode Delphi est avantageuse à bien des points de vue par rapport aux autres méthodes de prise de décision en groupe. Tout d'abord, la nature anonyme libère les participants des pressions du groupe. Deuxièmement, les conflits interpersonnels et la communication des problèmes sont laissés de côté. Troisièmement, l'approche itérative permet à l'équipe de recherche de rester concentrée sur l'étude.

### 3.3. Abaques de Régnier

Généralement les études Delphi s'appuient sur des échelles quantitatives pour récupérer les avis des experts. Notre étude vise principalement à récupérer des informations qualitatives sur le

processus planification. En conséquence, nous avons décidé de récupérer les informations à travers un outil de gestion de données qualitatives.

Les abaques de Régnier sont des outils de communication et de gestion d'information qualitative permettant de synthétiser des échanges (Lamouri, 1989). L'utilisation de ces mosaïques cherche à organiser l'expression des différents participants du groupe à partir des décisions colorées. Le Docteur Régnier a défini cette méthode comme une relation entre un système logique et une représentation statistique (Regnier, 1978).

La convention de couleurs de la palette repose sur les feux du trafic routier (vert, orange, rouge). La logique de l'échelle de décision colorée est la suivante :

- Vert : Tout à fait d'accord avec l'affirmation ;
- Vert Clair : Plutôt d'accord avec l'affirmation ;
- Orange : Avis partagé ;
- Rouge clair : Plutôt pas d'accord avec l'affirmation ;
- Rouge : Pas du tout d'accord avec l'affirmation ;
- Blanc : Ne sais pas ; et
- Noir : Ne veux pas répondre.

Une carte à trois dimensions permet de connaître le positionnement simultané de chacun des experts sur un sujet donné. Les trois dimensions sont : les affirmations (positionnées sur lignes), les experts (qui occupent les colonnes) et l'avis des experts par rapport à l'item (dans les intersections).

Nous avons employé un outil en mode Cloud, ColorInsight (<http://www.colorinsight.fr/>), pour mener les différents tours de l'étude Delphi. D'après (Maleki, 2009), cet outil fait partie des méthodes « Delphi de Conférence ». Ici, certaines tâches de l'équipe de pilotage sont remplacées par des technologies capables de traiter rapidement les réponses du pôle d'expert. L'outil permet ainsi de créer les questionnaires, convoquer les experts à participer à l'étude, récupérer les réponses des experts et visualiser l'information sous forme de tableaux colorés et d'histogrammes. Grâce à l'exploitation des résultats, nous avons pu identifier les consensus et

les dissensus des experts par rapport les processus de planification à moyen terme au sein de PME.

### 3.4. Organisation de l'étude

Loo (2002) définit quatre activités principales pour une méthode Delphi, à savoir : la définition du problème, la sélection du panel, la détermination de la taille du panel et la réalisation des tours Delphi. Maleki (2009) ajoute la formation de l'équipe de pilotage (responsable de définir la problématique de recherche) et l'analyse de données aux étapes mentionnées préalablement. Notre équipe de pilotage était constituée par le directeur de cette thèse doctorale, le codirecteur, l'encadrant industriel et la doctorante.

Comme le problème a été défini dans l'introduction du présent chapitre, nous développerons le reste des activités mentionnées antérieurement dans les sections restantes.

#### 3.4.1. Sélection des experts

Loo (2002) considère que les critères de sélection des experts pourraient non seulement être fondés sur leurs connaissances sur le sujet, mais aussi sur leurs expériences personnelles ou sur le fait d'être des parties prenantes. Keeney, et al. (2001) portent une attention particulière au processus de sélection d'experts, car il s'agit d'une conjecture majeure de la méthode Delphi. En fait, la sélection du panel peut influencer les résultats obtenus. Maleki (2009) souligne à ce propos que la composition et la taille du panel d'experts sont les facteurs qui ont la plus grande influence sur la convergence des jugements.

À partir des fonctions du Responsable PDP (chef planificateur) et de sa relation organisationnelle, tel que défini dans le sixième chapitre de (Vollmann, et al., 1992), nous avons déterminé les interlocuteurs du processus PDP. Les interlocuteurs suivants ont été identifiés : responsable d'ordonnancement, chef planificateur, responsable approvisionnement, responsables commerciaux, responsable production.

Nous avons envisagé d'inclure dans notre étude au moins une personne développant l'une des fonctions mentionnées ci-dessus. Il est important de mentionner que Kenney et al. (2001) considèrent que ce n'est pas parce qu'une personne a une certaine connaissance d'un sujet particulier qu'elle est un expert. Néanmoins, ils considèrent que les participants qui sont prêts

à s'engager dans une discussion seront plus intéressés et impliqués dans l'étude. C'est pourquoi les experts ont été choisis parmi les personnes directement impliquées dans le processus PDP.

### 3.4.2. Détermination de la taille du panel d'experts

Loo (2002), propose une sélection de 15-30 experts pour les populations hétérogènes et de 5-10 pour les populations homogènes. En plus de cela, ces auteurs considèrent que le panel devrait être composé d'experts qui représentent les différents points de vue. Keeney, et al. (2001) et Maleki (2009) estiment que la taille de l'échantillon et son hétérogénéité dépendent de l'objectif du projet et du temps de collecte des réponses.

Considérant que les experts font partie de la même entreprise, on peut les inscrire comme appartenant à la même population (homogène). Dans le but de disposer de tous les points de vue des participants au processus PDP, l'équipe de recherche a choisi 13 répondants parmi les fonctions décrites auparavant.

### 3.4.3. Création du questionnaire initial

Loo (2002) souligne que l'élaboration du premier questionnaire est une tâche qui nécessite d'identifier les objectifs et d'effectuer une recherche bibliographique pour inspirer les chercheurs sur la création des items et la sélection des échelles de réponse.

L'étude Delphi ici présentée a comme objectif, dans un premier temps, d'identifier parmi les niveaux de capacité des processus proposés par (Porter et Heppelmann, 2014) celui du processus PDP. Les niveaux de capacité définis dans ce modèle sont les suivantes :

- Surveillance : des alertes et des notification sont générés lorsqu'un changement de situation est détecté dans l'environnement de production. Le processus est soutenu par Excel ;
- Contrôle : des historiques des données sont exploités par des algorithmes pour vérifier la performance du système. Le système est capable d'alerter ou notifier quand il est nécessaire de prendre de décisions. Le processus est soutenu par plusieurs outils non intégrés ;
- Optimisation : un système ERP ou de multiples outils intégrés soutiennent le processus. Les outils sont capables d'optimiser en temps réel en prenant en compte une grande quantité des aléas ; et

- Autonomie : le système est capable d'apprendre de l'environnement, d'auto diagnostiquer les besoins et de s'adapter aux préférences des utilisateurs. Les ressources peuvent être coordonnés sans intervention vertical.

Dans un second temps, l'objectif est de proposer des solutions pour améliorer le processus PDP actuel à partir des difficultés et des opportunités d'améliorations identifiées dans l'étude.

Une revue de la littérature a été réalisée sur les bases de données scientifiques SCOPUS et Science Direct. Les mots clés suivants ont intégré les chaînes de recherche employées : « Survey », « Production Planning », « Industry 4.0 ». 18 articles ont été retrouvés dans les deux bases des données. Ensuite, une sélection à partir de la synthèse des références a permis de déterminer qu'aucune d'entre elles ne portait sur des études de cas. En conséquence, une deuxième recherche a été effectuée en excluant le mot « industry 4.0 » de la chaîne précédente. Une sélection initiale d'articles publiés dans des revues scientifiques et dans des conférences a permis d'identifier 126 (SCOPUS) + 23 références. Les références en doublon ont été prises en compte qu'une seule fois (15 références). Sept références ont été sélectionnées après lecture de leur résumé. Suite à une analyse intégrale du texte, nous avons sélectionné 6 (SCOPUS) + 1 (Science Direct) références qui constituent la base du questionnaire du premier tour.

À l'aide de ces études nous avons défini une liste d'items au tour de quatre thématiques, caractéristique du processus PDP, prise de décisions PDP, caractéristique du marché et retard commandes clients.

Tout d'abord, Tomotani et Mesquita (2017) présentent une étude sur le dimensionnement et la planification de la production par lots dans les entreprises brésiliennes. L'objectif de leur recherche est de caractériser les pratiques employées par les industriels pour traiter le problème du dimensionnement des lots. À partir de cette caractérisation, ils cherchent à mettre en évidence les besoins et les difficultés et ainsi définir de nouvelles opportunités de recherche. Les auteurs proposent une division de l'étude dans les thématiques suivantes : caractérisation du processus de production, processus de prise de décisions, difficultés et opportunités d'amélioration du processus PDP. Les auteurs ont mené leur étude en utilisant des questions ouvertes à l'aide de l'outil Google Forms. Les deux questionnaires de notre Étude Delphi ont été construits sur des thématiques similaires. Une description préalable du processus de production nous a permis de remplacer cette thématique par la caractérisation du processus PDP. Nous avons incorporé deux thématiques additionnelles : caractéristiques du marché et

retard de commandes clients. L'objectif de notre étude étant d'identifier les difficultés et les opportunités d'amélioration du processus PDP, nous n'avons pas étudié ce sujet comme une thématique individuelle, mais nous l'avons incorporé au sein d'autres thématiques.

Pour leur part, Land et Gaalman (2009) mènent une étude pour déterminer les effets de l'application des concepts de contrôle de la charge de travail sur les performances logistiques des petites et moyennes entreprises. Dans la première partie de l'étude, les auteurs précisent les problèmes de performance logistique des entreprises étudiées. Les entreprises qui font partie de l'étude sont décrites en fonction des critères suivants : complexité de la capacité, complexité des matériaux, complexité de l'ingénierie et caractéristiques du marché. Une fois que les problèmes de performance logistique ont été identifiés, un processus de diagnostic basé sur la collecte de données du statut des commandes est effectué. Ce processus permet de détecter la cause profonde des problèmes logistiques. Ensuite, l'étude essaye de déterminer les besoins pour résoudre ces problèmes. Enfin, l'objectif est d'identifier si les concepts de planification et du contrôle de la production, présents dans la littérature, proposent une alternative pour résoudre ces problèmes.

Nous avons incorporé la thématique de caractéristiques du marché à partir de cette étude.

Aussi, Khanh et Kim (2015) analysent les pratiques de planification de la production dans l'industrie de la construction au Vietnam. Axée sur le système du dernier planificateur (Last Planner System - LPS), leur recherche est fondée sur des questionnaires, des études de cas et des enquêtes auprès d'experts. Les questionnaires visent à mettre en évidence certains avantages et obstacles liés à la mise en œuvre de différentes procédures de planification finale dans les projets de construction. Ensuite, l'étude de cas vise à définir les performances de différentes méthodes de planification de la production dans des cas réels de projets de construction. La dernière étape de l'étude consiste à trouver des solutions aux problèmes identifiés grâce à des entretiens avec des experts en construction. L'étude permet aux auteurs d'identifier les obstacles existants des systèmes du dernier planificateur.

Parmi ces difficultés, nous avons identifié ceux qui avaient un lien avec le processus PDP ou bien qui pouvaient être transformés pour enquêter à propos des pratiques du PDP. Nous avons incorporé les obstacles suivants sur la forme d'items dans le questionnaire du premier tour :

- Faible compréhension du concept PDP ;

- Communication faible entre les participants du processus PDP ;
- Manque d'intégration des informations concernant les décisions prises lors des réunions PDP ;
- Objectifs différents de différentes parties prenantes ;
- Manque des outils support pour la prise de décisions ;
- Manque de processus standardisé pour la préparation et le déroulement des réunions PDP ; et
- aucune entrée et sortie spécifiée pour le processus PDP.

Jonsson et Ivert (2015) mènent une enquête dans les industries manufacturières suédoises pour mesurer les impacts des méthodes PDP sur la performance industrielle. Ils proposent d'étudier les performances en fonction de trois variables : la faisabilité du plan, la rotation des stocks et le service de livraison. Ils considèrent deux paramètres pour décrire l'environnement industriel, la complexité de l'environnement de production et la maturité du processus PDP. Ils ont utilisé des questionnaires avec des échelles de Likert pour collecter des informations. La complexité de l'environnement de planification est mesurée par l'incertitude de la demande (variations dans les prévisions), l'incertitude de la production (comme les perturbations de la capacité) et la complexité des détails (nombre de composants et de pièces qui affectent le PDP). Nous avons inclus certaines de ces mesures de la complexité dans le questionnaire du premier tour.

Des items dans les thématiques de caractéristiques du marché et du retard de commandes de clients incorporent cette notion de complexité de l'environnement de production.

Nous avons également incorporé des items concernant la performance du PDP avec des taux de rotation du stock, le respect des délais de livraison promis aux clients et le taux de service aux clients.

Wermus (2001) a conduit une étude dans certaines entreprises polonaises de fabrication sur commande afin de déterminer l'utilisation des techniques de planification et de contrôle de la production. L'étude se concentre sur le contrôle dans l'atelier. Une échelle de Likert à cinq points est utilisée pour recueillir les réponses des participants. Des dirigeants de grandes et moyennes entreprises ont répondu au questionnaire. La recherche propose des questions

relatives aux sujets suivants : autorisation de commencer à traiter une commande, niveau de gestion déterminant la séquence des travaux, critères utilisés pour déterminer la séquence des travaux, facteurs qui ont une influence sur les priorités de planification, définition de la date d'échéance et facteurs qui définit la taille des lots de production.

Cette étude nous a motivé à enquêter sur l'impact de la pression exercée par les clients sur les processus PDP, la clarté de la définition du processus PDP et de ses objectifs au sein de l'entreprise, l'utilité du PDP pour le travail des différents interlocuteurs, l'impact du changement des délais de livraison de la part de clients sur le PDP et l'effet des changements dans la conception et l'industrialisation sur la planification.

Mady (2000) étudie les pratiques de prévision de vente des entreprises manufacturières publiques égyptiennes. Ils recueillent des informations sur les dimensions suivantes du processus de ventes et de prévisions : unité organisationnelle, types de prévisions, outils déployés et difficultés rencontrées. Cette étude nous a amenés à incorporer des items associés aux outils informatiques employés dans le processus de préparation, de déroulement et postérieur aux réunions PDP. La section de difficultés rencontrées dans le processus de prévision de ventes nous a donné des idées pour la création des items concernant les objectifs du PDP et les données d'entrée.

Pyke, Robb et Farley (2000) présentent une enquête menée dans des entreprises chinoises qui cherche à mesurer la compétitivité sur la base des pratiques de fabrication et de gestion de la chaîne d'approvisionnement. L'enquête est menée auprès de 100 entreprises de différentes natures. Nous nous sommes concentrés sur les éléments liés aux pratiques de fabrication, car la nature de notre étude concerne la planification de la production. Parmi les multiples dimensions que les auteurs proposent d'analyser, l'une d'entre elles a retenu notre attention, à savoir l'impact des pratiques de fabrication sur l'amélioration des livraisons. Dans leur étude, les auteurs proposent de l'évaluer en fonction de la capacité à respecter les délais. Nous avons donc inclus dans notre premier questionnaire des éléments permettant d'évaluer l'impact du PDP sur l'amélioration des livraisons.

Finalement, Kamper et al. (2019) présentent une enquête qui cherche à déterminer l'efficacité des pratiques de planification et de contrôle de la production dans le processus de reconditionnement de produits complexes. Ils analysent les quatre dimensions suivantes : la disponibilité de l'information, le processus de décision au cours de l'opération de fabrication,

les stratégies de conception de la production et les méthodes de traitement des incertitudes. En ce qui concerne le processus de prise de décision pendant les opérations de reconditionnement, ils proposent des questions sur le respect des délais de production par rapport à la planification initiale. Nous avons ainsi ajouté des items à propos du respect du PDP dans les activités d'ordonnancement et de gestion de la production. En ce qui concerne le processus de décision, les auteurs proposent également des questions sur les conséquences des pièces manquantes dans le processus de production. Nous avons également incorporé l'influence de ce type de disruptions (matières premières manquantes) dans le premier questionnaire.

#### 3.4.4. Évolution du questionnaire

En ce qui concerne la proposition des nouveaux questionnaires, Maleki (2009) considère que l'envoi d'une synthèse du tour précédent permet aux experts de modifier ou bien de maintenir leur opinion initiale. À ce propos, Gordon et Hermer (1964) considèrent que ce retour d'information permet également aux experts de prendre en compte certains facteurs qu'ils ont peut-être négligés. De plus, ils conseillent de réduire autant que possible le laps de temps entre les tours successifs.

Pour la préparation de ces synthèses, Loo (2002) propose d'utiliser des données quantitatives et qualitatives. Ces données permettent également de soutenir la création du prochain questionnaire.

Un seul questionnaire a été proposé à l'ensemble des experts pour le second tour. Ce questionnaire comportait 38 nouveaux items issus des commentaires des affirmations ayant présenté des dissensus lors du premier tour. Les items de ce second questionnaire ont été rassemblés dans les cinq thématiques définies pour le premier questionnaire. L'équipe de recherche a décidé de ne pas ouvrir la proposition des questions aux experts entre les deux tours.

### 3.5. Synthèse de l'étude

Les deux questionnaires de cette étude ont été centrés autour de quatre thématiques : caractéristiques du processus PDP, prise de décisions PDP, caractéristiques du marché et retard de commandes clients.

Les résultats sont présentés par sous-thématiques sous la forme Questionnaire –Item. Nous faisons référence aux items présentés aux experts dans les questionnaires sous la formule suivante :

Qx-Iy : faisant référence au questionnaire x et à l’item y

À titre explicatif, la formule Q1-I2 pour la thématique caractéristique du processus PDP, fait référence au questionnaire 1 item 2 de cette thématique, soit : « Les données sur les en-cours sont très utilisées dans le processus/ le planning du PDP ». Des synthèses détaillées pour les deux tours avec le détail des items par thématique sont présentes en Annexes A et B.

### 3.5.1. Caractéristiques du processus PDP

La première thématique de cette étude concernait la définition des caractéristiques du processus PDP. L’objectif était dans un premier temps de comprendre les pratiques actuelles au regard des différents participants (occupant différentes positions hiérarchiques au niveau de la planification et faisant partie de différents départements-supply chain, ventes). Dans un second temps, l’objectif était d’identifier les opportunités d’amélioration de pratiques actuelles.

La caractérisation du processus s’est faite à partir de la définition de ses objectifs, l’identification des outils et des systèmes d’information exploités dans le processus, les données d’entrée et de sortie du PDP, la participation des parties prenantes, les standards du processus et finalement les dimensions de l’agilité.

Nous présentons par la suite le détail de ces sous-thématiques.

#### 3.5.1.1. Objectifs du PDP

En général le PDP comporte trois objectifs principaux : maintenir le niveau de service souhaité en établissant un calendrier pour répondre aux exigences de livraison des clients, optimiser l’utilisation du matériel et de la capacité (main d’œuvre et équipements), maintenir les inventaires aux niveaux requis (Arnold, Chapman and Clive, 2008). Nous avons d’abord demandé aux experts leur avis à propos de la clarté dans la définition de(s) l’objectif(s) du PDP au sein du groupe industriel. La moitié des experts s’est montrée mitigée sur la clarté de la définition des objectifs du PDP (Q1-I33). Ils considèrent que ceci est dû à un manque de

formalisation du processus. En conséquence, les objectifs du PDP sont différents en fonction du secteur de production du groupe.

Nous nous sommes également appuyés sur les objectifs généraux du PDP, proposés par Arnold, Chapman and Clive (2008). Nous avons d'abord demandé l'avis des experts par rapport au taux de service. Dans l'état actuel, les experts ne considèrent pas que le PDP ait une incidence positive sur le taux de service aux clients (Q1-I27). Ils considèrent que les délais de livraison clients peuvent être améliorés. Actuellement, la mise à jour fréquente du plan de livraison, hebdomadaire dans certains cas, diminue la fiabilité des informations données aux clients.

Dans le second questionnaire, nous avons constaté que la majorité des experts considère que la fiabilisation des délais de livraison clients doit être l'un des objectifs principaux du PDP (Q2-I28). Ceci permettra de communiquer à temps les changements des dates de livraison. La diminution du retard constitue un autre objectif primordial du PDP pour la majorité des experts (Q2-I13, Q2-I11).

Pour mesurer l'impact du PDP au niveau du taux de service, les experts constatent un manque d'indicateurs de performance leur permettant de déterminer l'écart entre les commandes acceptées et les commandes exécutées (Q1-I24).

En ce qui concerne l'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible, la majorité des experts considère que ceci est un autre objectif principal du PDP (Q2-I14). Ils ont également indiqué que l'absence d'indicateurs de performance ne leur permet pas de déterminer si jusqu'au présent le PDP a permis d'optimiser l'utilisation de la capacité de ressources impliquées dans la production (Q1-I26).

Pour le troisième objectif du PDP, l'optimisation des niveaux des inventaires, les experts ont indiqué que ceci n'est pas un des objectifs du PDP à l'heure actuelle (Q1-I28).

Selon Khanh et Kim (2015) et Vieira et Favaretto (2006), les parties prenantes défendent fréquemment des objectifs distants lors des réunions PDP. Les experts considèrent qu'il existe une coopération efficace entre les départements de production et Supply Chain (Q1-I31, Q2-I19). Contrairement à ceci, en fonction du secteur de production la collaboration entre les

départements de ventes et Supply Chain est plus faible (Q2-I18). Cependant, les experts pensent indispensable la collaboration entre les différents départements dans le processus PDP.

Pour faire un lien avec la sous-thématique suivante, outils et systèmes d'information, les experts ont indiqué qu'actuellement les outils exploités ne permettent pas de simuler l'impact d'une priorisation des objectifs. Ils considèrent que la simulation leur permettrait d'évaluer différents scénarios du PDP lors des réunions (Q1-I32).

### 3.5.1.2. Outils et systèmes d'information

Dans le but d'identifier le niveau de maturité d'un processus (Danjou, Rivest et Pellerin, 2016) d'enquêter à propos de l'intégration et de l'automatisation des outils et systèmes d'information. Les experts indiquent que l'intégration des outils et systèmes d'information employés dans le PDP est déployée à différents niveaux en fonction du secteur de production (Q1-I43).

Dans le second questionnaire, nous cherchions à différencier entre le partage des données et le partage de processus comme éléments fondamentaux de l'intégration. La majorité des experts considère que le partage des données liées au PDP est actuellement assuré par l'intégration des outils et systèmes d'information exploités (Q2-I33). Cependant, il n'est pas clair pour tous les experts si l'intégration assure le partage de processus (Q2-I34). Il semblerait qu'en fonction du poste occupé, le partage de processus soit plus ou moins développé.

Quant à l'automatisation des outils, nous avons étudié trois processus, soit : l'extraction des données, l'analyse des données et l'évaluation des décisions. En ce qui concerne l'extraction des données, la majorité des données exploitées pour la prise de décisions du PDP sont issues de l'ERP (Q2-I9). Cependant, les experts indiquent que les données de la capacité et de la charge ne peuvent pas être extraites de l'ERP par manque de fiabilité (Q1-I9).

Nous avons étudié l'analyse des données comme un processus associé à la prise des décisions. Très peu d'experts considèrent avoir les outils nécessaires pour supporter la prise de décisions du PDP (Q2-I12). Les experts remarquent que les processus de prise de décisions du PDP ne sont pas soutenus par la version actuelle de l'ERP (Sage X3) (Q1-I10, Q2-I35). Cette version

ne permet pas d'avoir une visibilité du rapport charge/capacité, car il y a des problèmes avec le paramétrage de postes de charge et la capacité disponible (Q2-I30).

La majorité des experts considère en conséquence qu'Excel est le support pour le processus décisionnel (Q1-I11, Q2-I36). Les experts considèrent que les outils construits à partir d'Excel permettent de visualiser correctement le rapport charge/capacité dans l'horizon PDP, uniquement si les données extraites de l'ERP sont fiables (Q2-I29). Cependant, les experts critiquent l'utilisation d'Excel, car il ne permet pas de simuler différents scénarios pour aider à la prise de décisions (Q2-I15). Les experts remarquent que les outils disponibles (ERP, outils Excel) ne leur permettent pas de calculer le lead-time critique ou plus long délai cumulé (Q2-I31, Q2-I32).

Finalement, en ce qui concerne l'évaluation des décisions, le partage d'informations de décisions prises lors des réunions du PDP est effectué principalement à l'aide d'Excel (Q1-I17). Les experts considèrent que le manque d'automatisation de supports Excel employés rend très compliquée la mise à jour des informations dans l'ERP (Q1-I18).

#### 3.5.1.3. Données d'entrée du PDP

Le processus PDP a besoin d'une quantité importante de données d'entrée, soit : PIC (Plan industriel Commercial), plan de ressources, stratégie commerciale par familles des produits, stratégie de pilotage des inventaires, plan de production, inventaires de matières premières et de produits finis disponibles, capacité disponible, entre autres.

Nous avons d'abord demandé aux experts si les données d'entrée du PDP avaient été clairement définies. Très peu d'experts considèrent que ces données ont été clairement identifiées (Q1-I34).

Actuellement, les données de charge et de capacité exploitées dans le PDP ne sont pas extraites des décisions du PIC dans la plupart des secteurs (Q1-I1). Les experts considèrent que ces données doivent être le plus alignées possible avec les conditions réelles de la production (Q2-I1). Cependant, ils soulignent que l'ERP actuel ne permet pas de faire une mise à jour en temps réel de ces données.

Le PDP utilise des données des gammes et de nomenclatures de production (Q1-I6, Q2-I6), pour le calcul de la charge. Toutefois, les experts se méfient de la fiabilité des temps renseignés dans l'ERP. Ils préfèrent, en conséquence faire des ajustements de ces valeurs à l'aide d'Excel (Q1-I8). Les macro-gammes et les macro-nomenclatures n'ont pas encore été déterminées au sein du groupe Exxelia (Q2-I7).

Les experts ont indiqué que les données de commandes de clients, accusées dans l'horizon de planification du PDP, sont une donnée d'entrée fondamentale (Q1-I4, Q2-I5). Les prévisions de la demande ou prévisions commerciales au-delà de cet horizon ne sont pas des données actuellement exploitées dans le PDP (Q1-I3, Q2-I4).

D'autres données d'entrée du PDP ont été jugées par les experts comme essentielles pour l'élaboration du plan final, telles que :

- la disponibilité de matières premières (Q1-I5) récupérée du plan d'approvisionnements mis à jour (Q2-I17) ;
- les données d'en-cours (Q1-I2). Néanmoins, les experts doutent de la fiabilité de ces données dans l'ERP (Q2-I2, Q2-I3) ; et
- les décisions prises lors des réunions PDP (Q1-I7).

Une minorité d'experts considère que le plan d'ordonnancement est une donnée d'entrée essentielle du PDP (Q2- I16).

#### 3.5.1.4. Données de sortie du PDP

Nous avons demandé l'avis des experts concernant l'utilisation des données de sortie du PDP. Même si le PDP a comme objectif de proposer un plan de livraison réaliste et optimal pour répondre aux exigences clients, les décisions de ce processus impactent les activités de fabrication, ordonnancement, approvisionnement et même du service commercial. Les experts considèrent que les décisions du PDP devraient être alignées avec le PIC, cependant ils indiquent que ce n'est pas le cas en ce moment (Q1-I16).

Par rapport à l'activité de production, les experts sont majoritairement mitigés sur l'alignement entre le lancement des ordres de fabrication dans les lignes de production et le PDP (Q1-I14). La mise à jour des dates de lancement des ordres de fabrication en fonction du repositionnement

de commandes défini lors des réunions du PDP rencontre actuellement des difficultés (Q2-I8). Ce processus n'est pas automatisé et prend un temps considérable.

Les experts ajoutent que des aléas, tels que les pannes machines, des matières premières manquantes, rendent compliquée l'adhérence du PDP au niveau opérationnel. Néanmoins, ils n'ont pas d'indicateurs du taux d'adhérence leur permettant de mesurer l'impact de ces aléas (Q1-I25).

Actuellement, le PDP fournit une base pour le planning proposé par le responsable de l'ordonnancement (Q1-I12) ainsi que pour l'approvisionnement (Q1-I13). Par rapport à la dernière activité, les experts indiquent que le PDP permet de générer les commandes à temps, uniquement si les dates des ordres de fabrication sont à jour.

Le service commercial indique communiquer le retard aux clients sur la base du PDP (Q1-I15).

#### 3.5.1.5. Participation des parties prenantes

Le PDP implique, en théorie, la participation des différents départements (ventes, production, approvisionnement, ordonnancement, chef planificateur et directeur qualité) (Q1-I35). Cependant, les experts indiquent que très souvent le groupe est réduit au chef planificateur et un second participant.

Les experts ont précisé que le PDP est en cours de déploiement et les parties prenantes n'ont pas été définies dans tous les secteurs (Q2-I20). Dans les secteurs dans lesquels elles ont été définies, deux participants sont ajoutés à la liste précédente : le responsable méthodes et le responsable bureau d'études.

#### 3.5.1.6. Standardisation du processus

La majorité d'experts considèrent que le processus PDP n'a pas été clairement défini au sein du groupe Exxelia (Q1-I36). Ils considèrent aussi que les étapes du processus n'ont pas encore été clairement définies (Q2-I21). Nous avons demandé l'avis d'experts par rapport aux différentes étapes du processus PDP, soit : la préparation et le déroulement des réunions et la communication après les réunions.

Très peu de participants considèrent que la préparation des réunions a été clairement définie au sein du groupe industriel (Q1-I37). Malgré le manque de clarté dans la définition du déroulement des réunions PDP (Q1-I39), les experts considèrent que les réunions sont constructives et les objectifs sont clairs (Q1-I38).

L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée à tous les participants (Q1-I40). Le partage d'informations des réunions PDP est effectué sur différents formats en fonction du secteur de production. Les formats employés sont des plans de production, des plans d'action et des comptes rendus (Q2-I22, Q2-I23, Q2-I24). Le format privilégié est le plan de production. Aucun format de plan d'action ni de compte rendu n'a été formalisé pour l'ensemble de secteurs. Ainsi, les experts considèrent que le processus de communication entre les participants du PDP n'est pas clair (Q1-I41).

#### 3.5.1.7. Dimensions de l'Agilité dans le PDP

Nous avons analysé quatre dimensions de l'agilité parmi les six identifiées dans les travaux d'Alberts et Hayes (2003), soit : adaptabilité, réactivité, flexibilité et robustesse. L'étude d'adaptabilité du PDP a été faite sur les points d'analyse suivants : absentéisme, annulation de commandes, changement des délais de livraison, rupture de matières et pannes machines.

Les experts considèrent majoritairement que le PDP est adaptable face à l'annulation d'une commande client (Q1-I23). Ils considèrent également que le PDP est robuste (Q2-I27).

En ce qui concerne les aléas capacitaires, le PDP n'est pas actuellement adaptable vis-à-vis des variations capacitaires engendrées par les pannes machines (Q1-I19) ni par l'absentéisme de collaborateurs (Q1-I20). Les outils exploités actuellement ne permettent pas de simuler des variations capacitaires générées par l'absentéisme (Q2-I10).

Dans la théorie, les experts considèrent que le PDP doit être adaptable face aux changements des délais de livraison des commandes clients. Cependant, ils précisent qu'actuellement le PDP ne permet pas de considérer ces changements (Q1-I22). Le planning PDP n'est pas non plus adaptable en pratique aux ruptures de matières premières (Q1-I21).

Il n'est pas clair pour tous les participants si le PDP est réactif (Q2-I25) et s'il est flexible (Q2-I26).

### 3.5.2. Prise de décisions PDP

La deuxième thématique de cette étude concerne le processus de prise de décisions associées au PDP. Dans la thématique précédente, nous avons identifié les outils et systèmes d'information exploités dans la prise de décisions. Dans cette section, notre analyse est centrée sur les éléments intervenant dans la prise de décision et la fréquence de mise à jour des décisions du PDP.

Nous avons proposé d'analyser l'intervention des éléments suivants sur le processus de prise de décisions : disponibilité de matières, niveau de service, niveau des stocks, stabilité de la production et utilisation des ressources.

Les experts considèrent que la disponibilité de matières premières a une influence sur les décisions du PDP quand le délai demandé par le client est inférieur au lead-time total (lead-time approvisionnement et lead-time de production) (Q1- I1). Ils ont précisé que les propositions du PDP considèrent la disponibilité théorique des matières premières (Q2 -I1).

La majorité des experts considère que le niveau de service a une forte influence sur les décisions du PDP (Q1-I5). Ils considèrent aussi, majoritairement, que les délais de traitement des commandes sont calculés sur la base du plus long délai cumulé (Q2-I2). Un autre facteur qui porte une influence sur les décisions du PDP est le niveau du stock (Q1-I6).

La majorité des experts considère que la stabilité de la production a une influence sur les décisions du PDP (Q1-I3). La production n'est pas considérée stable dans le processus actuel (Q2-I3, Q2-I4).

Comme les lignes de production ont la majorité de postes de charge occupés par de la main d'œuvre, les experts considèrent que l'utilisation des ressources a une forte influence sur les décisions du PDP (Q1-I4).

Par rapport à la fréquence de mise à jour des décisions PDP, les experts estiment que les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à jour fréquemment (Q1-I7). Cependant, ils considèrent majoritairement que le PDP assure la légitimité des décisions prises lors des réunions (Q2-I5).

### 3.5.3. Caractéristiques du marché

Dans cette thématique, nous cherchions à caractériser la demande dans l'horizon du PDP en termes de : incertitude, variabilité et effet de la pression exercée par les clients.

Les experts indiquent que la demande dans l'horizon du PDP n'a pas d'incertitude (Q1-I2). Dans cet horizon, les données de demande comportent uniquement des commandes fermes. En fonction du secteur de production, le carnet de commandes est plein à différents horizons (entre quatre et huit mois) (Q2-I1).

Pour ce qui est de la variabilité de la demande, les experts précisent que dans la majorité de secteurs elle présente des variations considérables dans le long terme, mais pas dans l'horizon du PDP (Q1-I3, Q2-I2). Les experts précisent que la récurrence de demande d'un même produit est faible.

Finalement, les experts remarquent que les clients exercent une pression considérable sur les délais de livraison (Q1-I1).

### 3.5.4. Retard de commandes clients

Le partenaire industriel a un problème de retard de livraison de commandes clients. Nous avons proposé de séparer l'analyse du retard en deux phases, amont de la production et pendant la production.

Pour les causes de retard en amont de la production, nous avons proposé aux experts de porter leur jugement sur l'impact du retard fournisseurs et des temps de conception et d'industrialisation. Les experts considèrent que le retard fournisseurs est l'une des causes principales du retard de commandes clients (Q1-I1). En fonction du secteur de production, les temps de conception et d'industrialisation peuvent être sous-estimés. Ceci porte une influence sur le retard de commandes clients (Q1-I4).

Les experts ont exprimé leur avis sur deux causes du retard associées à la production, la visibilité et le dimensionnement du rapport charge/capacité et les écarts entre le PDP et le temps réel des lignes de production.

Les experts considèrent que le dimensionnement inapproprié de la capacité des ressources par rapport à la charge est la cause principale du retard de commandes clients (Q1-I2). Ils ont indiqué également qu'une autre cause du retard concerne l'oubli de l'addition de la charge du retard à la charge actuelle (Q1-I3).

Les experts considèrent que les écarts entre les informations en temps réel des lignes de production et les données informatiques ont une forte influence sur le retard de commandes clients (Q1-I5). Ils disent manquer d'outils pour récupérer ces informations. Ils considèrent qu'un suivi hebdomadaire de la quantité produite vs la quantité planifiée s'avère indispensable (Q2-I1).

Items du premier questionnaire que nous n'avons pas utilisé : Caractéristiques PDP Q1-I42, Q1-I30, Q1-I29.

### 3.6. Conclusion de l'étude

L'étude Delphi-Régnier, présentée dans les sections précédentes, a été conduite pour atteindre les sous-objectifs suivants :

- Déterminer le niveau de maturité du processus PDP actuel sur la base du modèle proposé par (Porter et Heppelmann, 2014);
- Identifier les difficultés du processus actuel ;
- Proposer des opportunités d'amélioration au processus PDP.

Nous avons proposé aux participants de l'étude plusieurs affirmations qui cherchaient à caractériser le processus PDP. À partir du positionnement des experts par rapport à ces affirmations, nous avons pu répondre à nos objectifs.

#### 3.6.1. Niveau de capacité du processus PDP

Le positionnement d'experts par rapport aux affirmations proposées lors du premier et second tour nous a permis de déterminer que le processus PDP est actuellement dans un niveau discipliné du modèle proposé par le CEFRIO (2016). Le PDP est soutenu par plusieurs outils (Excel et ERP-Sage X3). L'intégration de ces outils assure en grande partie le partage des données. Cependant, le partage de processus n'est pas assuré par cette intégration.

En ce qui concerne l'automatisation, Excel est la base de la prise de décisions. La version actuelle de l'ERP ne permet pas de soutenir ceci.

En termes de niveau de capacité pour le pilotage de systèmes de production (Porter & Heppelmann, 2014), les utilisateurs peuvent contrôler différentes variables de façon séparée. La charge, la capacité théorique et la disponibilité de matières sont les variables actuellement contrôlées par les outils exploités.

Ces outils ne permettent pas d'optimiser en temps réel en considérant des aléas, tels que : les variations capacitaires, les inventaires des en-cours variables, la rupture de matières et le changement de délais de livraison.

Toutefois, les commentaires des experts nous permettent de juger qu'ils attendent acquérir un niveau de maturité supérieur du PDP. L'objectif est d'arriver au niveau intégré pour assurer l'optimisation de la performance de ce processus.

### 3.6.2. Difficultés

Nous avons regroupé les difficultés autour de trois sous-thématiques, les difficultés associées aux outils, aux données et au processus.

Quant aux outils, les chefs planificateurs manquent d'outils leur permettant d'évaluer la priorisation d'objectifs différents. Ils sont, en conséquence, démunis pour atteindre les objectifs du PDP. Nous avons donc constaté le manque de procédures et de méthodes, comme identifié par (Moeuf *et al.*, 2018).

Les outils actuellement exploités sont peu automatisés. En conséquence, la mise-à-jour des données, issues des décisions prises dans les réunions PDP, n'est pas effectuée dans l'ERP. Les nouvelles dates de lancement des OF, issues du repositionnement de commandes, sont rarement modifiées.

En ce qui concerne les données, les experts considèrent que les données de la charge issues de l'ERP sont peu fiables. La gestion centralisée des données est, en effet, une caractéristique des ERP qui génère ce type de problématiques (Tobón Valencia *et al.*, 2018). Les estimations

inappropriées des temps des gammes de fabrication génèrent des dimensionnements incorrects de la capacité dans le PDP.

Les données des inventaires en-cours, manquent également de fiabilité. Les experts remarquent qu'il y a des écarts considérables entre la production en temps réel et les données stockées dans l'ERP. Ceci induit des problèmes d'adhérence du plan d'ordonnancement avec le PDP. Les outils exploités dans le processus actuel ne permettent pas de récupérer en temps réel les données d'avancement de la production dans les ateliers.

L'horizon de planification du PDP doit être supérieur au délai de fabrication et d'approvisionnement si les matières premières ne sont pas stockées. L'estimation de ce délai (lead-time critique) permet d'assurer la livraison de commandes clients dans les délais contractuels. La version actuelle de l'ERP n'a pas la valeur du lead-time (LT) critique pour les produits finis (articles directeurs). En conséquence, le calcul du plus long délai cumulé est fait sur Excel à partir des données issues de l'ERP. Les valeurs calculées du LT critique ne sont pas correctes, car les calculs considèrent une disponibilité théorique de matières primaires. En plus, certains délais de conception et d'industrialisation sont sous-estimés.

Les délais de traitement de commandes sont calculés sur la base d'un délai cumulé qui n'est pas juste. En conséquence, les planificateurs font très souvent face à des retards sur les livraisons de commandes clients. De leur côté, les clients exercent une pression de plus en plus significative sur les responsables commerciaux pour qu'ils maintiennent les délais de livraison.

En plus du problème du retard, mais associé toujours au calcul du plus long délai cumulé, les responsables de planification n'ont pas pu définir les zones à l'intérieur de l'horizon de planification du PDP. En général, l'horizon du PDP est divisé en trois zones : ferme, flexible et libre. L'horizon ferme correspond au cycle de production. Dans cet horizon uniquement, les modifications d'urgence sont acceptées de sorte que la modification des ordres de fabrication est fortement déconseillée.

Actuellement, des changements dans l'horizon ferme du PDP sont effectués au sein du groupe industriel pour faire face à des problèmes capacitaires et de disponibilité de matières premières. Ces changements ne permettent pas d'assurer des niveaux de service satisfaisants auprès de clients externes et diminuent la productivité.

Finalement, nous présentons les difficultés associées au processus de planification. Plusieurs éléments nous ont permis de constater un manque de formalisation et standardisation du PDP. Tout d'abord, les objectifs de ce processus de planification n'ont pas été clairement définis. Ainsi, la prise de décisions est faite en fonction de priorités différentes dans chaque réunion. De plus, les plans proposés sont mis à jour fréquemment.

Le manque de clarté dans la définition des objectifs du PDP laisse place à une absence d'indicateurs de performance. Il n'est pas donc possible de mesurer l'impact des décisions associées à ce processus en termes de : niveau de service, utilisation de la capacité ou rapport charge/capacité. Les participants aux réunions et les responsables de la planification n'arrivent pas à déterminer les points d'amélioration associés au PDP.

Associé au manque de formalisation du PDP, les fonctions des parties prenantes (responsable ordonnancement, responsable approvisionnement, responsable commercial, responsable production, responsable supply chain et responsable planification PDP) n'ont pas été définies. De ce fait, il y a un manque de participation des différentes parties prenantes, dans le processus. Les participants ne savent pas à quel moment ils peuvent et doivent intervenir. Ils attendent les consignes des responsables planification PDP pour exercer des fonctions précises.

Les formats de communication, tels que compte rendu et plan d'action, n'ont pas été formalisés. Par conséquent, les informations associées aux décisions PDP ne sont pas toujours diffusées auprès des participants. Ainsi, rien n'assure l'exécution des actions attendues de la part des différentes parties prenantes, telles que la mise-à-jour des dates de livraison de commandes clients dans l'ERP et la communication de ces dates d'auprès de clients.

### 3.6.3. Opportunités d'amélioration

En vue des difficultés identifiées dans le processus de planification PDP actuel, nous proposons des opportunités d'amélioration concernant les outils et les données exploitées.

Il est indispensable de munir les responsables du PDP (chef planificateur) d'outils leur permettant de supporter la prise de décisions. Les experts considèrent que les objectifs principaux du PDP sont la fiabilisation des délais de livraison des clients, l'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible et la diminution du retard. Il est en conséquence

indispensable de munir les chefs planificateurs d'outils leur permettant d'optimiser ces objectifs. Il est également important de donner accès aux chefs planificateurs aux outils de simulation. Ces outils leur permettraient d'évaluer la priorisation des différents objectifs dans des scénarios de production différents. La construction, de différents scénarios permettraient d'évaluer l'impact des variations capacitaires, du repositionnement de la charge ou bien de la variation des niveaux d'inventaires. Il serait en conséquence plus simple d'identifier les contraintes des différents secteurs de production et d'évaluer la faisabilité du PDP. L'exploitation des outils de simulation permettrait d'assurer la réactivité du PDP.

En ce qui concerne les données, la définition de macro-gammes et de macro-nomenclatures dans les différents secteurs de production permettrait de réduire les problèmes associés à la capacité et à la rupture de matières premières. Le projet de changement de l'ERP comporte un travail sur les données des temps opératoires qui cherche à diminuer les écarts entre les données informatiques et les données enregistrées dans le système. La nouvelle version de l'ERP permettra également de récupérer en temps réel les temps d'opérateurs des collaborateurs. Ceci cherche à ajuster les données de la capacité.

Il est important d'envisager un alignement entre les objectifs de production du plan proposé par le PDP et les décisions du PIC. De cette façon, les responsables du PDP pourraient valider les propositions capacitaires des ressources critiques, établis par le PIC, dans des horizons plus courts.

Finalement, pour mieux formaliser le processus PDP, il serait important de définir une feuille de route précisant les actions à mener pour permettre de faire une transition entre le niveau discipliné (niveau actuel) et un niveau intégré. Cette transition devrait assurer dans un premier temps l'intégration entre l'ERP et des autres outils informatiques employés dans PDP. Dans un second temps, les outils exploités devront permettre d'optimiser les objectifs du PDP pour mieux supporter le processus de prise de décisions des responsables de la planification.

La structuration du PDP dans un niveau intégré permettrait d'incorporer d'autres dimensions de l'agilité, telles que la flexibilité et la réactivité, à ce processus de planification. Le PDP doit être suffisamment agile pour faire face aux aléas rencontrés dans son horizon de planification, et ce, en même temps pour assurer un niveau de service capable de répondre aux attentes des clients.

Nous présentons dans les sous-sections suivantes les limites de cette étude ainsi que les perspectives identifiées.

#### 3.6.4. Limites

La première limite de cette étude est associée à la composition du panel d'experts. La sélection de participants de l'étude comporte un biais subjectif de l'équipe de pilotage. Même si le panel comportait au moins deux participants de chaque fonction associée au PDP, le choix d'experts a été fait sur certains secteurs de production au sein de deux sites de production.

Une autre limite concerne le niveau de maturité du PDP au sein du groupe industriel qui fait l'objet de notre étude. Associée à ceci, le niveau de connaissances des participants par rapport au PDP était varié. Le niveau de maturité et l'expertise sur ce sujet ont un impact sur le positionnement de certains participants. Plusieurs items sont restés sans consensus lors du second tour.

Enfin, nous avons proposé des opportunités d'amélioration en lien avec les particularités du contexte industriel. La liste proposée peut être biaisée par rapport à la problématique de recherche et nos connaissances du milieu industriel.

#### 3.6.5. Perspectives

Notre étude permet d'identifier les difficultés et opportunités d'amélioration du processus PDP dans un contexte industriel de PME manufacturière française. Cependant, le manque de cas d'étude nous empêche de faire une analyse statistique correcte pour dérouler les résultats à une échelle nationale. L'extension d'une étude dans plusieurs entreprises avec un contexte industriel similaire permettrait de proposer des conclusions plus générales par rapport aux caractéristiques et difficultés des processus de planification à moyen terme, actuels.

Il serait également intéressant d'étendre les résultats d'une telle étude au niveau d'autres secteurs industriels.

Notre étude s'arrête à l'identification des opportunités d'amélioration. La définition d'une feuille de route pour passer d'un niveau de maturité à un autre serait une bonne manière de

guider au mieux les dirigeants des PME. Ceci permettrait d'accompagner la transformation des pratiques de planification dans le cadre de la quatrième révolution industrielle.

L'étude Delphi-Régnier nous a permis d'identifier plusieurs opportunités d'amélioration associées au processus PDP de notre partenaire industriel. Nous avons constaté que le processus n'a pas été clairement défini. En conséquence, le processus est actuellement mené de façon différente dans chaque secteur de production. Les participants du processus n'ont pas un guide précisant les activités, le rôle des parties prenantes, les objectifs et le processus de prise de décisions du PDP.

Une autre opportunité d'amélioration est associée à l'absence des dimensions de l'agilité dans le processus PDP actuel. En relation avec cette opportunité, les résultats de l'État de l'Art que nous avons présenté dans le premier chapitre nous ont permis de constater que l'exploitation des technologies 4.0 dans les processus de planification de la production permet d'atteindre différentes dimensions de l'agilité. Cependant, la recherche actuelle n'a pas précisé les groupes technologiques 4.0 les plus adaptés au contexte industriel et organisationnel des PME leur permettant d'aborder l'agilité dans les processus de planification.

# Chapitre 4 : Modélisation processus PDP 4.0 - BPMN

## 4.1. Introduction

L'étude Delphi-Régnier que nous avons exposée dans le chapitre précédent nous a permis de constater que le processus PDP au sein de PME n'est pas standardisé et ne présente aucune dimension d'agilité. Nous cherchons dans ce chapitre à répondre à ces opportunités de recherche. Notre premier objectif est de proposer un standard pour le processus PDP de notre partenaire industriel. Ensuite, nous cherchons à associer les technologies 4.0 aux activités du processus PDP pour le rendre agile. Dans la première section, nous présentons une synthèse de la théorie du PDP comme activité de planification de la production. La méthodologie BPMN que nous avons employée pour la modélisation du processus PDP est introduite dans la deuxième section. Dans la troisième section, nous décrivons le processus PDP actuel de notre partenaire industriel. Un standard d'un processus PDP mature est exposé dans la quatrième section. La cinquième section comporte l'intégration des groupes technologiques 4.0 dans les activités du PDP. Finalement, nous présentons les conclusions et opportunités de recherche.

## 4.2. Planification de la production et PDP

Les activités de planification de la production sont généralement regroupées en trois niveaux de décision selon l'horizon de planification, la granularité de l'information et les objectifs poursuivis. Ainsi, le niveau opérationnel est défini pour un horizon de planification à court terme (entre une semaine et un mois) ; la planification tactique a été définie pour un horizon à moyen terme (entre 6 et 18 mois), et enfin, le niveau stratégique (entre deux et cinq ans) couvre les décisions dans le long terme. Ces activités sont basées sur deux principes, la gestion des priorités et la gestion de la capacité. La gestion des priorités est centrée sur le client. Elle permet de déterminer les quantités de produits à livrer pour une date prédéterminée. Le deuxième principe, gestion de la capacité, est une réponse du fabricant au client. Il compare la capacité des ressources disponibles, les fonds financiers et la disponibilité des matières premières avec la demande afin d'identifier ce dont l'entreprise a besoin pour respecter les délais contractuels (Arnold, Chapman et Clive 2008).

La planification stratégique gère la satisfaction de la demande, en prenant en considération la stratégie générale de l'entreprise et en fournissant un cadre pour les niveaux de décision inférieurs. La planification tactique définit, au niveau des articles directeurs, la quantité qui doit être produite dans chaque période de l'horizon de planification afin de satisfaire la demande des clients dans des conditions de production optimales. Enfin, la planification opérationnelle gère les flux physiques pour assurer la disponibilité des produits dans le système de production selon ce qui a été défini au niveau tactique (Gourgand, Lemoine et Norre 2010).

Les cinq activités suivantes ont été associées aux trois niveaux de décision : le plan stratégique (horizon de planification à long terme), le PIC (horizon de planification tactique), le PDP (horizons de planification tactique et opérationnelle), le CBN (calcul de besoins nets) et le pilotage d'atelier (horizons de planification opérationnelle). À chaque niveau, la définition des priorités, des capacités disponibles, des différences entre les priorités et les capacités et des alternatives pour résoudre ces différences conduisent le développement des activités.

La figure 13 nous permet de placer chacune de ces activités de planification dans une ligne de temps pour l'horizon de planification. Elle détaille également, sur le côté gauche, le niveau de granularité des données pour chaque activité. En fait, lorsque l'horizon de planification est proche du niveau opérationnel, le niveau de détail des données employées dans la planification de la production est plus important. En revanche, à un niveau de planification stratégique, les données utilisées sont plus agrégées.

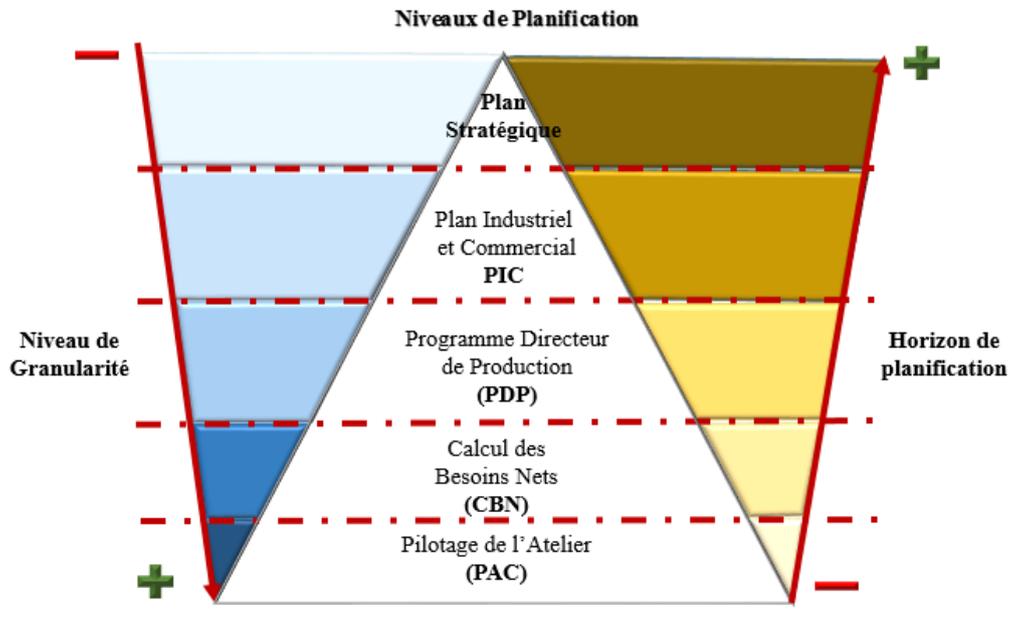


Figure 13 : Activités de planification de la production et relation avec l'horizon de planification et la gestion des données

Dans un horizon de planification à moyen terme, le PDP décompose le PIC pour les produits individuels dans un horizon de planification plus court (Akhoondi et Lotfi 2016). L'horizon de planification du PDP doit être au moins aussi long que le plus long délai cumulé d'approvisionnement et de production (Baglin, et al., 2015).

Le PDP est une base importante pour la communication entre la gestion des commandes des clients et la production, car il permet au service commercial de définir les quantités qui peuvent être réservées aux clients et les dates auxquelles les commandes clients doivent être livrées (Jonsson et Ivert 2015). Deux des trois objectifs du PDP peuvent être récupérés de cette définition, assurer la satisfaction client à travers le respect des délais de livraison, tout en contrôlant les niveaux des stocks (APICS 2011, Perrot et Villumus, 2018).

Le processus PDP a deux livrables principaux. Le premier livrable est un plan de production qui indique les quantités de produits finis à fabriquer par semaines dans l'horizon PDP. Le second livrable est un plan d'entrée pour l'ordonnancement qui indique le moment de production de chaque ordre de fabrication.

Comme mentionné par Jonsson et Ivert (2015), il existe une différence entre les résultats du PDP et les objectifs que l'entreprise cherche à atteindre avec le processus PDP. L'un des

résultats les plus importants du PDP est un plan de production réalisable qui indique ce qui doit être produit en fonction d'un ou de plusieurs des objectifs suivants : augmenter la productivité, utiliser au mieux la capacité disponible, améliorer le service envers les clients et maintenir les stocks à un niveau souhaité.

Le PDP doit passer par une optimisation des objectifs de la demande et de l'offre dans le cadre des stratégies de l'entreprise. Il est complexe pour une entreprise de travailler tout le temps avec la capacité exacte disponible. Le chef planificateur ou gestionnaire PDP doit évaluer différents scénarios du PDP en fonction de la faisabilité des changements de production (Vollmann, et al. 1992). En fait, le PDP lui-même ne garantit pas une utilisation optimale des ressources ni un respect des délais de livraison. Il exige des systèmes de gestion qui assurent la réactivité lorsque des perturbations apparaissent (Proud 1999). Il s'agit d'un processus complexe et essentiel pour traduire les objectifs stratégiques en programmes de production faisables. Nous présenterons dans la section 5 le détail des activités de ce processus.

### 4.3. Modélisation BPMN 2.0

La version BPMN 2.0 (de l'anglais *Business Process Modeling Notation*) a été proposée en 2011 par l'Object Management Group (OMG)<sup>4</sup>. C'est une méthodologie pour l'analyse et la conception de processus industriels.

Le BPMN permet d'avoir une notation compréhensible par toutes les personnes participant à la conception d'un processus. Ainsi, le personnel responsable de modéliser le processus, les développeurs techniques responsables de déployer l'architecture technologique pour exécuter le processus et les responsables de contrôler le processus, utilisent un standard de modélisation commun (White, 2004).

Les éléments graphiques employés dans le BPMN peuvent être regroupés dans quatre catégories :

- Objets de flux : Activités, évènements et passerelles font partie de cette catégorie. Les activités sont la décomposition séquentielle du travail accompli à l'intérieur d'un processus. Elles consomment du temps et ont besoin d'allouer des ressources pour transformer les entrées en un ou plusieurs objets de sortie.

---

<sup>4</sup> Le standard est disponible en ligne sur le site suivant : <http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/>

Les évènements représentent des situations qui se produisent lors de la réalisation des activités d'un processus. Les passerelles sont utilisées pour représenter les divergences et les convergences retrouvées ou niveaux des flux séquentiels d'activités ;

- Connecteurs : sont utilisés pour mettre en relation les objets de flux. Ils permettent de définir la séquence d'exécution des activités et de représenter les échanges des messages ;
- Couloirs : sont employés pour modéliser les participants du processus. Les couloirs de participants qui font partie d'une même entité, équipe, entreprise, peuvent être regroupés dans un bassin ; et
- Artefacts : sont des objets de données ou bases des données qui contiennent des informations nécessaires pour l'exécution des activités.

Nous présentons dans le tableau suivant les éléments graphiques que nous avons utilisés et leurs significations.

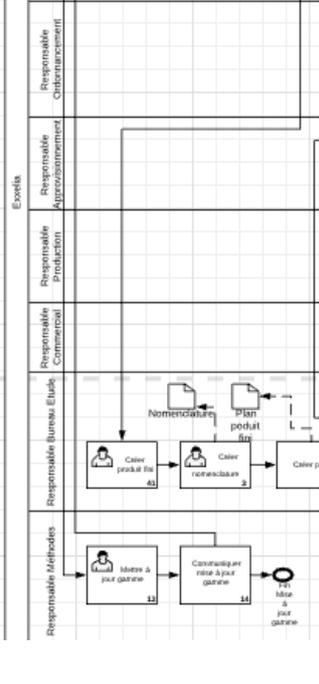
Objets de connexion	
Enchaînements des activités	
Associations avec des fichiers	
Objets d'organisation	
L'entreprise est présentée sous forme d'un bassin. À l'intérieur les différents acteurs sont représentés par des couloirs	
Activités	
Tâche	
Branchements	
Exclusif (ou)	
Parallèle (et)	
Évènements	
Début de Processus	 Évènement
Évènement de fin	 Évènement
Évènement intermédiaire	 Évènement

Tableau 10 : Éléments graphiques utilisés

## 4.4. Processus PDP actuel (T0)

Nous avons d'abord modélisé le processus actuel du PDP de notre partenaire industriel. Le modèle que nous présentons ici concerne un PDP pour des lignes de production avec les caractéristiques suivantes : plusieurs lignes d'assemblage, fabrication par lots, fabrication principalement artisanale, plusieurs références de composants et de matières premières, stratégie de production d'assemblage sur commande (en anglais *Assemble-To-Order* ATO) ou d'ingénierie sur commande (en anglais *Engineering-To-Order* ETO).

La modélisation BPMN a été employée pour modéliser le processus PDP actuel de notre partenaire industriel. Pour la lecture des modèles, les éléments graphiques utilisés et leurs significations sont résumés dans le Tableau 10.

Le processus PDP actuel de notre partenaire industriel comporte deux sous-processus principaux, la planification de la capacité et des approvisionnements et l'ajustement du PDP suite au CBN. La figure 14 présente la modélisation de ces sous-processus.

Les intervenants ou acteurs impliqués dans le PDP sont : le responsable Supply Chain du site, le chef planificateur, le responsable ordonnancement, le responsable des approvisionnements, le responsable production, le responsable commercial, le responsable BE (bureau d'études) et le responsable méthodes.

Nous présentons par la suite une description des activités de chaque sous-processus. Dans les modèles BPMN de chaque sous-processus T0 nous avons identifié les activités avec un ID numérique. Nous faisons référence aux activités avec l'ID numérique entre parenthèses.

### 4.4.1. Sous-processus 1 : Planifier capacité et approvisionnements

Nous présentons dans la figure 15 le modèle BPMN de ce sous-processus.

4.4.1.1. Positionnement des quantités à produire en fonction du besoin client, de la capacité démontrée, et information existante (projet, BE, commercial, approvisionnement, industrialisation...).

Le chef planificateur vérifie les besoins des clients à partir de la demande validée dans le PIC et à l'aide de l'ERP (1.1). Si le besoin n'a pas encore été confirmé (commande client non

validée, mais en cours de négociation), le chef planificateur positionne les besoins dans une date lointaine à l'intérieur de l'horizon du PDP (1.15).

Si le besoin a été confirmé, le chef planificateur vérifie l'information existante associée au produit commandé par le client d'auprès des responsables BE, commercial et méthodes. Ainsi, le chef planificateur vérifie si le produit a été fabriqué préalablement (1.2 - T0). Si le produit n'a pas été fabriqué antérieurement le responsable du BE crée la référence du produit fini dans l'ERP (1.35 - T0) et sa nomenclature (1.3 - T0). À la suite de l'élaboration du plan CAO du produit fini (1.4 - T0), le responsable BE demande la création de la gamme de fabrication au responsable méthodes (1.5 - T0). À ce moment le responsable méthodes vérifie s'il est possible d'associer le produit avec une gamme existante (1.6 - T0) à partir de l'ERP. S'il n'est pas possible d'associer le produit avec une gamme existante, le responsable méthodes crée une gamme pour le produit dans l'ERP (1.7 - T0) et il associe ensuite le produit à la gamme (1.8 - T0). Dans le cas contraire, le responsable méthodes peut associer une gamme existante au produit à l'aide de l'ERP (1.8 - T0).

Avec la gamme de fabrication, le plan CAO et la nomenclature, le responsable BE crée le dossier de fabrication du produit (1.9 - T0). Il doit ensuite vérifier l'existence d'outillage de fabrication pour fabriquer le produit (1.10 - T0). Si l'outillage est existant, il complète la création du produit, autrement il crée le plan d'outillage à l'aide de la CAO (1.11 - T0).

Si le produit a été fabriqué antérieurement le chef planificateur vérifie la mise à jour de la gamme de fabrication du produit (1.12 - T0). Si la gamme n'est pas à jour, le responsable méthodes met à jour la gamme dans l'ERP (1.13 - T0) et communique la mise à jour au chef planificateur (1.14 - T0).

Une fois les activités précédentes complétées pour l'ensemble des produits à planifier, le chef planificateur prépositionne les quantités à produire (1.15 - T0) dans le Fichier PDP niveau 1 (fichier Excel). À l'aide de ce fichier, il vérifie la capacité démontrée (1.16 - T0).

#### 4.4.1.2. Mise à jour fichier effectif (présence, compétences, productivité)

Le responsable production met à jour le fichier des effectifs pour un horizon de neuf mois (fichier Excel) (3 - T0). Les tâches suivantes intègrent ce sous-processus :

- Le responsable production met à jour la présence des effectifs ;

- Le responsable production met à jour les compétences des effectifs dans une matrice de polyvalence ;
- Le responsable production met à jour la productivité des effectifs. Un coefficient est associé à chaque opérateur par semaine de planification. La valeur du coefficient évolue par mois en fonction de la courbe d'apprentissage du collaborateur ; et
- Le fichier permet au responsable production de calculer de façon automatique la capacité par semaine et par macro-poste de charges.

#### 4.4.1.3. Lissage du PDP, charge versus capacité

Le chef planificateur vérifie la capacité démontrée à l'aide du Fichier PDP niveau 1 et le fichier des effectifs (1.16 - T0). L'analyse de charges globales est conduite à l'aide du fichier Excel RCCP (de l'anglais Rough Cut Capacity Planning) (1.17 - T0).

Si le rapport charge-capacité est cohérent, c'est-à-dire : il ne présente pas de surcharge, le chef planificateur demande l'approbation du PDP au responsable de production (1.18 - T0). Le responsable de productions valide le PDP (1.24 – T0) et le chef planificateur communique le PDP (1.25 – T0). Dans le cas contraire, le chef planificateur ajuste le PDP. L'ajustement concerne le repositionnement des commandes dans des semaines de planification différentes (1.19 - T0)

#### 4.4.1.4. Mise à jour des dates de fin des ordres de fabrication de produits finis et création des ordres de fabrication dans l'ERP

Le chef planificateur communique la mise à jour de dates de fin des ordres de fabrication des produits finis à l'ordonnanceur à travers le fichier PDP RCCP (1.20 - T0). À partir des informations renseignées dans ce fichier, le responsable ordonnancement vérifie l'existence de l'ordre de fabrication dans l'ERP (1.21 - T0). Si l'ordre de fabrication de produit fini a déjà été créé, le responsable ordonnancement met à jour les dates de fin dans l'ERP (1.22 - T0). Il est aussi nécessaire de mettre à jour les dates de fabrication des produits semi-finis dans les ordres de fabrications respectifs (1.36 - T0). Quand le responsable ordonnancement oublie de mettre à jour la date de fin des produits semi-finis associés alors qu'il était nécessaire de les fabriquer plutôt, un problème de disponibilité de matières peut apparaître au moment de la fabrication.

Si l'ordre de fabrication du produit fini n'a pas été créé, le responsable ordonnancement crée l'ordre de fabrication dans l'ERP (1.23 - T0). Ce mode de fonctionnement génère souvent des

composants manquants au moment de fabriquer par oubli de création des ordres de fabrication de semi-finis de la part de l'ordonnanceur.

#### 4.4.1.5. Valider PDP

Le responsable production valide le PDP (1.24 - T0). Pour donner suite à cette validation, le chef planificateur communique le PDP ajusté dans le fichier RCCP (1.25 - T0).

#### 4.4.1.6. Mise à jour date actualisée de production des lignes de commandes

Le chef planificateur met à jour la date actualisée de production des lignes des commandes une fois par semaine à travers l'ERP (1.27 - T0). Un message est généré automatiquement lors de changements sur les dates de production actualisées. Ce message est transféré au responsable commercial (1.28 - T0). Pour donner suite à l'actualisation des dates de production, le responsable commercial communique les changements dans la date de livraison au client (1.29 -T0).

Après avoir complété la mise à jour des dates de production, le chef planificateur calcule la valeur du retard sur les commandes à l'aide du portefeuille des commandes clients (fichier Excel) (1.30 - T0). Le calcul de la projection du retard sur le chiffre d'affaires est effectué après (1.31 - T0). Ensuite, le chef planificateur analyse les causes du retard (1.32 - T0) et propose un plan d'action pour la gestion des retards (1.33 - T0). Ce plan d'action permet d'incorporer des améliorations pour l'ajustement du PDP. Le chef planificateur manque très souvent de temps pour élaborer ce plan d'action.

#### 4.4.1.7. Exécution et suivi du PDP

Le chef planificateur calcule l'adhérence de la production au PDP (4 - T0). Ce processus comporte les tâches suivantes :

- Le chef planificateur vérifie le plan de lancement des ordres de fabrication ;
- Le chef planificateur met à jour la rentrée de stock en magasin. Ceci concerne les produits finis déclarés par la production ;
- Le chef planificateur communique la rentrée de stock de produits finis en magasin ; et
- Le chef planificateur compare la rentrée de stock de produits finis en magasin avec les quantités de produits finis planifiées dans le PDP.

#### 4.4.1.8. Diffusion hebdomadaire du Plan de Chargement Camion

Le chef planificateur met à jour les expéditions de la semaine à partir des changements des dates de commandes (1.34 - T0). Un fichier Excel à partir des extractions de l'ERP est généré automatiquement (Plan de Chargement de Camion). Ce Plan est communiqué au service logistique.

#### 4.4.1.9. Lancer le CBN

Le CBN se fait de façon automatique dans l'ERP les mardis de chaque semaine (1.26 - T0)

### 4.4.2. Sous-processus 2 : Ajuster PDP après CBN

Nous présentons dans la figure 16 le modèle BPMN de ce sous-processus.

#### 4.4.2.1. Une fois l'exécution du CBN, mise à jour de dates des ordres de fabrication de produits semi-finis

Le chef planificateur vérifie la disponibilité des produits semi-finis à l'aide de l'ERP (2.1 - T0). Si le produit semi-fini est disponible, le chef planificateur définit les actions de traitement du produit semi-fini (2.2 - T0) et communique ces actions au responsable ordonnancement (2.3 - T0). À partir des directives communiquées par le chef planificateur, le responsable ordonnancement met à jour les dates de fin des ordres de fabrication de produits semi-finis (2.4 - T0).

Si le produit semi-fini n'est pas disponible, c'est-à-dire le besoin n'est pas couvert par un ordre de fabrication du produit semi-fini, le chef planificateur alerte le responsable ordonnancement sur le problème (2.5 - T0). Le responsable de l'ordonnancement crée l'ordre de fabrication du produit semi-fini (2.6 - T0) et communique la meilleure date de fin au chef planificateur (2.7 - T0).

#### 4.4.2.2. Vérification des approvisionnements

Le responsable des approvisionnements vérifie la disponibilité des matières premières ou de composants à l'aide du fichier (Excel) PDP niveau 2 et du CBN (2.8 - T0). Le Fichier PDP niveau 2 extrait des informations de l'ERP sur les ordres de fabrication de produits finis créés par le responsable ordonnancement.

Le responsable des approvisionnements communique une fois par semaine la disponibilité des composants au chef planificateur (2.9 - T0).

#### 4.4.2.3. Réajustement PDP selon le retour du responsable des approvisionnements

Le chef planificateur met à jour le PDP à partir de la disponibilité des matières premières, des semi-finis et des composants indiqués par les responsables approvisionnement et le responsable ordonnancement (1.19 - T0).

#### 4.4.3. Constats processus PDP actuel

Pour donner suite à la modélisation du processus actuel de notre partenaire industriel, nous avons constaté un problème de délégation des fonctions. Le chef planificateur est responsable de plusieurs fonctions qui pourraient être réalisées par d'autres acteurs du processus PDP. Ainsi, des tâches telles que la vérification de la disponibilité de produits semi-finis et la définition des actions de traitement des semi-finis pourraient être sous la responsabilité de l'ordonnanceur avec une tâche de contrôle de la part du chef planificateur. Similairement, toutes les tâches de vérification de la mise à jour et de la disponibilité du dossier de fabrication et de la gamme de fabrication devraient être faites par les responsables BE et méthodes.

D'autres tâches, comme la mise à jour des dates de fin de fabrication sur les lignes des commandes demande beaucoup de temps de la part du chef planificateur. Cette mise à jour est faite manuellement dans l'ERP au niveau de chaque commande. L'importation du PDP dans l'ERP permettrait d'automatiser ce type de tâches.

En ce qui concerne les technologies et systèmes d'information employés dans les activités du PDP, nous avons remarqué que la plupart des activités de calcul sont faites à l'aide d'outils customisés sur Excel. Aucun groupe technologique du 4.0 n'est actuellement employé dans le processus de planification. Selon l'échelle proposée par CEFRIO (2016), le processus PDP actuel a un niveau intégré parce qu'il est soutenu par un ERP. Cependant, les autres outils informatiques utilisés ne sont pas intégrés avec l'ERP.

Nous avons également constaté un manque de processus de communication entre les différents acteurs. Le chef planificateur est au cœur de tous les échanges. La plupart des informations sont transmises à l'oral ou par échanges de mails sans être enregistrées dans une base de données ou rapports.

Dans le quotidien de l'entreprise, beaucoup d'activités que nous avons modélisées ne sont pas faites par un manque de temps de la part du chef planificateur.

Suite à ces constats, nous avons décidé de modéliser un processus PDP standard ou mature pour donner un guide de transformation à notre partenaire industriel. Nous présentons dans la section suivante ce processus en identifiant les activités qui devraient être incorporées dans le processus de planification actuel.

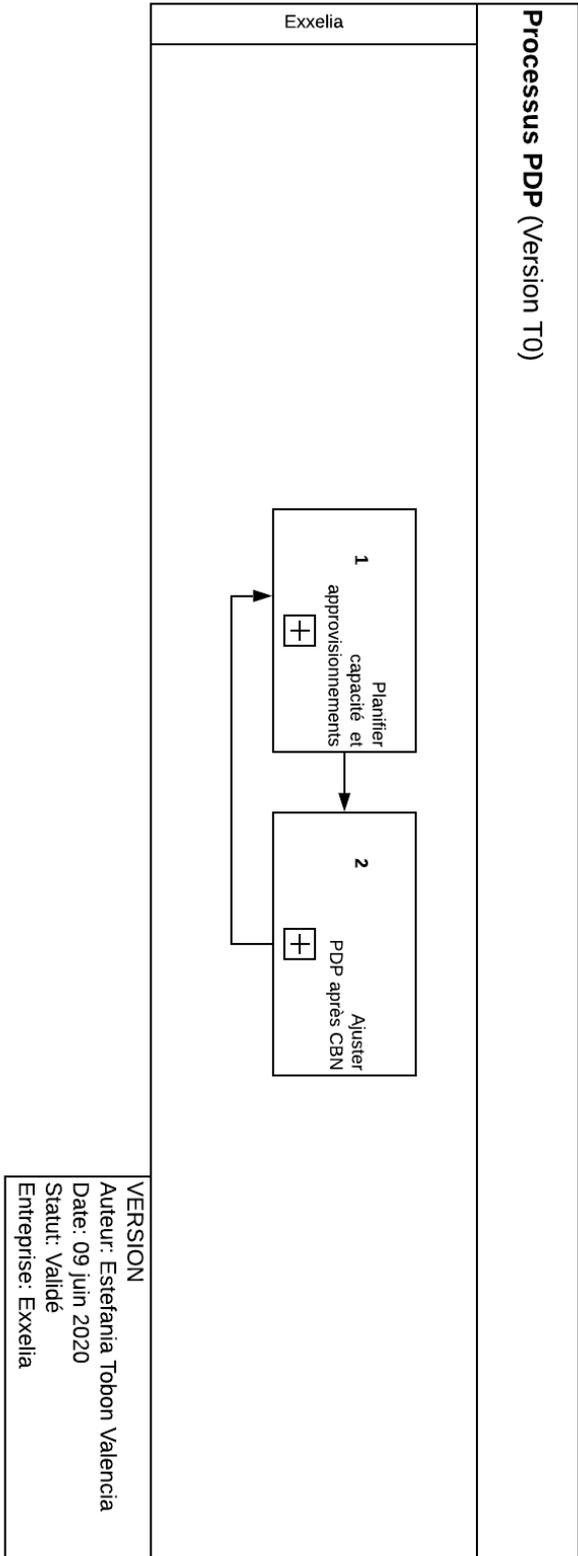


Figure 14 : Processus PDP T0



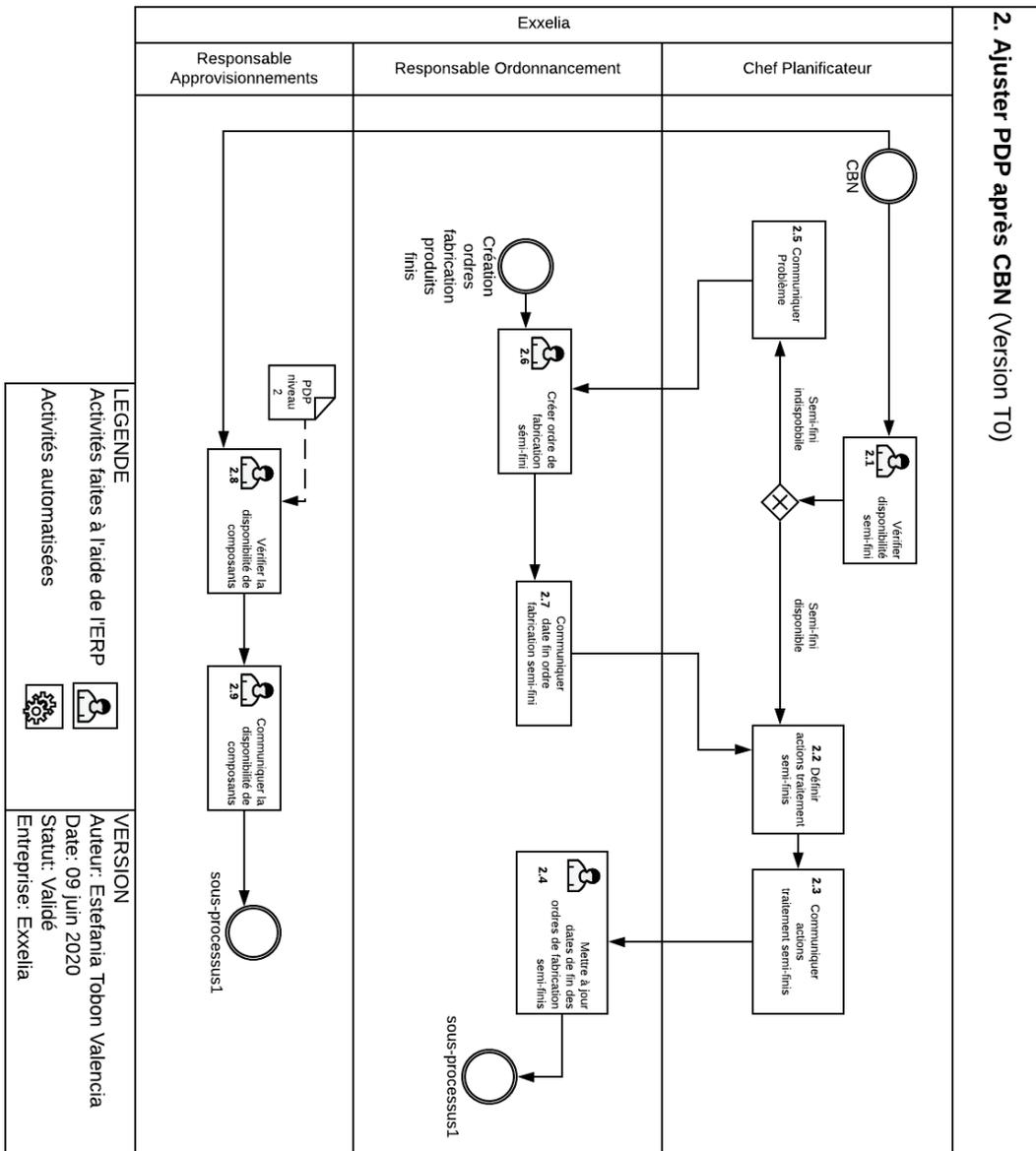


Figure 16 : Ajuster le PDP après le CBN (T0)

## 4.5. Processus PDP mature (T1)

Il y a deux méthodes principales de planification PDP, par gestion de stock et par exploitation de la connaissance de besoins futurs (Baglin, et al., 2015). La première méthode fait appel à l'utilisation des méthodes de gestion de stock pour gérer le réapprovisionnement. La seconde méthode exploite les prévisions de vente et les commandes fermes pour faire une projection de stock prévisionnel et prendre les décisions de réapprovisionnement sur cette base. Cette méthode permet de répondre aux besoins clients et de minimiser le stock de produits finis ou articles fabriqués.

Nous allons baser notre proposition du processus PDP standardisé sur la méthode d'exploitation des prévisions de vente et commandes fermes. Sur cette logique, le processus PDP est intégré par quatre sous-processus fondamentaux, comme suit :

- Planification de la demande/gestion de la demande (sous-processus 2 – T1) ;
- Planification-gestion de la capacité et des approvisionnements/PDP préliminaire, calcul de charges globales et plan d'ordonnancement (sous-processus 3 – T1) ;
- Réunion PDP (sous-processus 4 – T1) ; et
- Gestion de la capacité suite aux calculs CBN (sous-processus 5 – T1).

Nous avons incorporé un processus additionnel, la définition des paramètres généraux du PDP (sous-processus 1 – T1). L'étude Delphi-Régnier que nous avons présentée dans le Chapitre 3 nous a permis de constater que dans le processus PDP actuel, les paramètres du processus et les indicateurs de performance n'avaient pas été clairement identifiés. Le sous-processus 1 cherche en conséquence à proposer une solution à cette difficulté.

La figure 17 présente les sous-processus précédemment mentionnés avec les relations des entrées et de sorties entre eux.

Pour la modélisation au niveau de sous-processus nous avons gardé le même groupe d'interlocuteurs définis dans le modèle T0. Ceci permettra à notre partenaire industriel de se repérer facilement lors de la mise en place des nouvelles activités. Nous décrivons par la suite les activités associées à chaque sous-processus. Nous faisons référence aux activités représentées dans les modèles BPMN à travers l'ID numérique associé.

La modélisation BPMN a été employée pour synthétiser le processus PDP mature. Pour la lecture des modèles T1, les éléments graphiques utilisés et leurs significations sont résumés dans le tableau 10.

#### 4.5.1. Sous – processus 1 : Définition des paramètres généraux PDP

Avant de se lancer sur la planification PDP, il est essentiel de définir les paramètres généraux ou donnés d'entrée du PDP. Nous présentons le modèle de ce sous-processus dans la figure 18.

La première activité cherche à définir ou à mettre à jour les articles directeurs du PDP (1.7 – T1). Pour y arriver, il faut réaliser les activités suivantes préalablement :

- Le chef planificateur doit identifier les ressources critiques (1.1 – T1). Aussi connus comme goulets, ces postes ont une capacité contrainte qui rythme le flux de production. Il y a des goulets dits structurels qui indépendamment du programme de production se trouvent souvent dans des conditions de surcharge. Un autre type de goulets sont dits conjoncturels, en fonction du programme de production ils peuvent ou pas être engorgés. Une fois les ressources critiques identifiées, le responsable de production valide le caractère critique (1.18 – T1). Une fois les goulets identifiés et validés, le chef planificateur peut déterminer le plus long délai de fabrication (1.2) ; et
- L'étape suivante concerne l'évaluation des composants critiques, soit ceux avec de longs délais d'approvisionnement. Le responsable des approvisionnements détermine les composants, matières ou sous-ensembles avec le plus long délai d'approvisionnement (1.3 – T1). Ensuite, il est nécessaire de comparer les délais contractuels des approvisionnements avec le plus long délai de fabrication (1.4 – T1). Ceci permettra d'identifier les composants critiques soit ceux avec un délai d'approvisionnement plus long que le plus long délai de fabrication. Avec ces informations le chef planificateur peut valider les composants critiques (1.6 – T1). Ensuite, avec le plus long délai d'approvisionnement, le plus long délai de fabrication et des règles de séquençement, le chef planificateur définit les articles directeurs du PDP (1.7 – T1). Ces articles doivent être associés à l'une des familles du PIC (1.4 – T1).

À ce point, le chef planificateur doit associer les macro-gammes et macro-nomenclatures à chaque article directeur PDP (1.10 – T1). Les macro-gammes, définis pour chaque article

directeur, indiquent les temps opératoires moyens et considèrent les temps de réglage pour une taille de lot spécifique. Les macro-nomenclatures définissent pour une famille d'articles les composants critiques. Les macro-nomenclatures sont définies par le responsable du BE (1.8 – T1). Il faut ensuite charger les macro-nomenclatures dans le système de calcul de besoins nets (ERP) (1.11 – T1). Ceci permettra d'avoir les composants critiques disponibles à temps et permettra au responsable ordonnancement de définir l'allocation anticipée (1.12 – T1) des composants.

Il est essentiel d'avoir une bonne gestion des données techniques avant de lancer un processus PDP. Les données techniques suivantes doivent être mises à jour dans le système ERP : commandes et prévisions de demande (1.16 – T1), stocks ou inventaires des produits finis (1.17 – T1), nomenclatures (1.19 – T1), stocks ou inventaires des matières et des semi-finis, ressources critiques (1.18 – T1) et gammes (1.20 – T1) (Baglin, et al., 2015).

L'identification des composants critiques permettra au chef planificateur de définir l'horizon du PDP (1.13 – T1). Cet horizon doit avoir une valeur maximale équivalente à la somme des plus longs délais d'approvisionnement et de fabrication. La valeur minimale de cet horizon peut être le plus long délai de fabrication. La définition de cet horizon permet d'avoir de la visibilité et donne une marge de manœuvre aux planificateurs pour faire face aux événements inattendus. À partir de l'horizon PDP, le chef planificateur peut définir les zones à l'intérieur de l'horizon du PDP (1.15 – T1), zone gelée, zone flexible et zone libre, et les fenêtres de planification (1.14 – T1). Nous décrivons par la suite chaque zone de l'horizon PDP :

- Zone gelée ou figée : comporte une période dans lesquels les changements sont non négociables ou bien très compliqués d'être mis en place. Les changements entraînent des coûts élevés. Cette zone comporte uniquement des commandes fermes. La période correspond au plus long délai d'assemblage ou de fabrication ;
- Zone flexible ou négociable : dans cette période des modifications dans les choix des composants sont possibles tant qu'elles respectent les limites du plus long délai cumulé. Elle comporte uniquement des ordres de fabrication planifiés ; et
- Zone libre : dans cette période tout changement reste possible. Le chef planificateur et le responsable de production ont le temps de décider d'une augmentation capacitaire et le repositionnement de la charge.

Deux fenêtres se positionnent entre ces zones. La fenêtre de la demande, entre les zones gelée et flexible, est déterminée par les clients. La fenêtre de planification, entre les zones flexible et libre, est déterminée par le plus long délai cumulé.

Finalement, le chef planificateur doit déterminer la valeur cible des indicateurs de performance du PDP (1.21 – T1), ou bien mettre à jour cette valeur. Les indicateurs de performance doivent traduire les objectifs de l'entreprise pour le processus PDP. Des exemples d'indicateurs de performance sont présentés par la suite :

- Nombre de commandes en retard ou retard cumulé sur les commandes (taux de service) (1.22 – T1) ;
- Niveaux de stocks (1.23 – T1),
- Adhérence au PDP, soit la quantité produite versus la quantité planifiée (taux de service et utilisation des ressources) (1.24 – T1) ;
- Coûts associés aux ajustements PDP (surcoûts des heures supplémentaires, sous-traitance, retard sur chiffre d'affaires, licenciement, embauche) (1.25 – T1) ; et
- Une fois tous les paramètres précédemment mentionnés définis, le processus PDP peut commencer. L'entreprise doit définir la fréquence de mise à jour de ces paramètres.

#### 4.5.2. Sous – processus 2 : Planification de la demande

Nous présentons dans la figure 19 la modélisation des activités de ces sous-processus. La demande du PDP est composée de quatre éléments principaux, la demande du PIC, les besoins confirmés, les besoins non confirmés et les commandes en retard.

La planification de la demande du PDP commence par une mise à jour de la demande du plan de ventes du PIC (2.1 – T1). Le chef planificateur fait une désagrégation de cette demande par article directeur PDP (2.2 – T1).

D'un autre côté, le responsable commercial valide la date, quantité et type produit commandé dans les commandes fermes (2.3 – T1). Le chef planificateur met à jour la date de commandes fermes dans l'outil de calcul PDP (2.5 – T1). Dans un système de fabrication sur commande le

PDP est fait sur les commandes fermes. La fabrication d'ingénierie sur commandes est une forme particulière de la stratégie de fabrication sur commande.

Le chef planificateur met à jour les hypothèses de la demande à l'aide du responsable commercial. Le responsable commercial doit aussi mettre à jour les besoins non confirmés (2.4 – T1). Ces données seront incluses comme hypothèses de la demande dans les calculs du PDP. Le quatrième élément composant la demande du PDP est associé aux commandes en retard. Le chef planificateur met à jour les commandes en retard dans l'outil PDP (2.8 – T1) à partir des données issues de l'activité 3.38 – T1.

Finalement, le chef planificateur consolide et valide la demande sur les articles directeurs du PDP dans l'outil PDP (2.6 et 2.7 – T1). Dans un système avec une stratégie de production d'assemblage à la commande le PDP serait fait sur les sous-ensembles majeurs ou sur les produits finis.

#### 4.5.3. Sous - processus 3 : Planification-gestion de la capacité et des approvisionnements

Ce sous-processus comporte trois activités principales : la proposition d'un PDP faisable, l'analyse des charges globales et la définition d'un plan de base pour l'ordonnancement des ordres de fabrication. Nous présentons dans la figure 20 les activités associées à ce sous-processus.

Dans le chapitre 6 nous allons présenter un algorithme heuristique pour l'optimisation du PDP fondé sur un modèle mathématique que nous présenterons dans le chapitre 5. Nous avons détaillé les activités qui peuvent être faites à l'aide de cet outil d'optimisation dans le modèle BPMN de ce sous-processus avec la notation A. heuristique (A d'algorithme) entre parenthèses.

Chaque semaine le sous-processus commence par la détermination de la performance du PDP de la semaine précédente (3.1 – T1). Si les valeurs des indicateurs de performance du PDP de la semaine précédente sont égales à la cible, le chef planificateur peut proposer un PDP à partir du plan de demande validé par article directeur et du dernier plan de production validé du PIC (3.2 – T1). Dans le cas contraire, il faut déterminer la cause des écarts entre les valeurs cibles et les valeurs réelles des indicateurs de performance (3.34 – T1).

Les causes peuvent être associées à la capacité. Il faut déterminer s'il est nécessaire de mettre à jour la capacité (3.3 – T1). Le Responsable de Production met à jour la capacité disponible (sous – processus 6 – T1). Dans un système de fabrication artisanale, ce sous-processus comporte la mise à jour des facteurs d'efficacité, les compétences des collaborateurs et la distribution des collaborateurs dans les postes de charge.

Si les causes de la mauvaise performance du PDP sont associées à la charge, il faut vérifier s'il est nécessaire de modifier les données exploitées pour le calcul de charges (3.4 – T1). S'il faut les modifier, le responsable méthodes doit vérifier les macro-gammes, ajuster les temps alloués aux macro-gammes et les mettre à jour dans l'ERP (3.5 et 3.6 – T1). Le responsable BE vérifie les macros- nomenclatures, à partir de la disponibilité des composants, et les met à jour dans l'ERP (3.7 et 3.8 – T1).

Suite à la mise à jour des macro-gammes et macro-nomenclatures, le chef planificateur propose un PDP préliminaire à partir du plan de demande validé par article directeur du PDP et du dernier plan de production validé du PIC (3.2 – T1). Ce PDP est proposé à l'aide de l'outil PDP. À partir du PDP préliminaire, le chef planificateur vérifie la disponibilité des composants (3.9 – T1). D'un côté, le responsable ordonnancement vérifie la disponibilité de semi-finis ou sous-ensembles fabriqués en interne à l'aide de l'ERP et communique au chef planificateur cette disponibilité (3.10 et 3.11 – T1). D'un autre côté, le responsable des approvisionnements vérifie la disponibilité de matières premières et composants fabriqués à l'externe, à l'aide de l'ERP et communique cette disponibilité au chef planificateur (3.12 et 3.13 – T1).

En ayant connaissance de la disponibilité de composants, matières premières et sous-ensembles, le chef planificateur ajuste le PDP préliminaire (3.35 – T1) et analyse l'état des inventaires des composants (3.36 – T1). Ceci permet de calculer l'indicateur niveau d'inventaires composants qui sera communiqué en réunion PDP.

À partir du PDP proposé et de la disponibilité des composants, le chef planificateur calcule la charge induite par le programme de production sur les ressources critiques (3.14 – T1). Ensuite, il est nécessaire de comparer cette charge avec la capacité disponible (3.15 – T1) et vérifier si

la capacité disponible est suffisante (3.16 – T1). Les activités précédentes sont faites avec l’outil PDP.

Si l’analyse des charges globales est satisfaisante, le chef planificateur communique l’analyse de charges globales (3.17 – T1). Un PDP réalisable est également communiqué. Avec ce plan il sera possible de déterminer les priorités du plan d’ordonnancement (3.31 – T1) et de planifier les ordres de fabrication des produits finis (3.33 – T1), il permet également de calculer le disponible à la vente par semaine (3.32 – T1). Le disponible à la vente concerne les quantités qui peuvent être vendues sans entraîner une modification du PDP. Dans un contexte de fabrication d’assemblage sur commande, la notion du disponible à vente est moins importante.

Suite à la proposition d’un PDP réalisable, il sera aussi nécessaire de calculer le retard sur les commandes (3.38 – T1). Le chef planificateur doit aussi déterminer les coûts associés à ce retard (3.39 – T1).

Lorsque les résultats de l’analyse de charges globales ne sont pas satisfaisants, le chef planificateur résout les problèmes d’adéquation charge-capacité (3.18 – T1). Il sera nécessaire de vérifier s’il y a des capacités disponibles en amont (3.26 – T1). S’il y a une capacité disponible en amont, le chef planificateur repositionne le traitement de certaines commandes en amont à l’aide de l’outil PDP (3.27 – T1). Le chef planificateur doit ensuite vérifier l’autorisation du repositionnement à partir des zones dans l’horizon PDP (3.37 – T1). Si le repositionnement est autorisé, l’analyse de charges globales doit être réévaluée.

Quand il n’y a pas de capacités disponibles en amont, le chef planificateur évalue avec le responsable de production la possibilité d’augmenter la capacité (3.19 – T1). Le responsable de productions vérifie s’il est possible de travailler en heures supplémentaires (3.20 – T1), d’augmenter temporairement les effectifs (3.21 – T1) ou de sous-traiter la production (3.22 – T1). Après avoir validé l’augmentation capacitaire (3.23 – T1), le chef planificateur doit incorporer cette variation dans le PDP (3.24 – T1) et relancer l’évaluation du rapport charge capacité dans les postes critiques. Il est nécessaire aussi de déterminer les coûts associés à ces variations capacitaires (3.39 – T1).

S'il n'est pas possible d'augmenter la capacité, le chef planificateur doit vérifier s'il est possible de diminuer la charge (3.25 – T1). Il est nécessaire de consulter alors le responsable commercial pour envisager la possibilité de décaler la livraison. Le responsable commercial négocie le décalage avec le client (3.28 – T1) et incorpore le changement de date de livraison dans l'ERP (3.29 – T1). Ainsi, le chef planificateur peut repositionner la charge (3.30) et relancer l'analyse des charges globales. Il est nécessaire aussi de déterminer les coûts associés aux changements de dates de livraison client (3.39 – T1). Ceci permettra de calculer la valeur de l'indicateur coût associé aux changements PDP.

#### 4.5.4. Sous - processus 4 : Réunion PDP

En début de la réunion hebdomadaire, le chef planificateur communique la valeur des indicateurs de performance du PDP de la semaine précédente (4.1 – T1) : commandes en retard, niveaux des inventaires, adhérence au PDP et coûts induits aux ajustements PDP (surcoûts des heures supplémentaires, sous-traitance, valeur du retard sur le chiffre d'affaires). À l'aide des indicateurs de performance et du plan d'action établi dans la réunion de la semaine précédente, le chef planificateur présente la performance du PDP de la semaine précédente (4.2 – T1).

Ensuite, à l'aide de l'analyse de charges (rapport charges globales) et du plan de production au niveau de détail des articles directeurs PDP, le chef planificateur communique la situation de la planification de la demande et des charges globales (4.3 – T1).

L'étape suivante concerne la révision du PDP pour la semaine en cours (4.4 – T1). Les invités à la réunion donnent leur accord sur le PDP proposé (4.19 – T1). Si l'accord de tous les participants est favorable, le PDP est validé (4.5 – T1). Le PDP validé doit être importé dans l'ERP (4.7 – T1) avant de lancer le calcul de besoins nets (4.12 – T1). Ensuite, le chef planificateur propose un plan d'action dans lequel il indique les tâches à réaliser par intervenant du processus PDP (4.6 – T1). Un compte rendu de la réunion doit aussi être élaboré (4.8 – T1). Ce compte rendu permet de communiquer les priorités du plan d'ordonnancement (4.13 – T1), le disponible à la vente (4.14 – T1) et le plan de base pour l'ordonnancement (4.15 – T1).

À partir du plan et des priorités d'ordonnancement, le responsable de l'ordonnancement vérifie l'existence de l'ordre de fabrication du produit fini dans l'ERP (4.16 – T1). Si l'ordre de

fabrication existe, la date de fin est mise à jour (4.17 – T1). Si l'ordre n'existe pas, il est créé (4.18 – T1).

Si le PDP proposé ne reçoit pas l'accord de tous les participants à la réunion, il est nécessaire d'identifier les risques ou problèmes (4.9 – T1), par exemple des risques associés à la disponibilité des composants ou des problèmes capacitaires. Ensuite, il faut définir les actions à lancer pour résoudre le problème ou limiter le risque (4.10 – T1). Ces actions doivent être standardisées. Par exemple : quand il y a du retard, afin de livrer dans les meilleurs délais : travailler des heures supplémentaires, mettre en place le travail en rotation des équipes, embaucher du personnel, recourir à de la sous-traitance, utiliser la polyvalence, diminuer le temps réglage (s'il s'agit d'une machine). Quand il y a un risque de ne pas livrer à temps, il est aussi nécessaire de définir une priorité dans la fabrication des commandes clients.

Ensuite il faut proposer un nouveau PDP (4.11 – T1) et relancer les activités du processus 3 en urgence.

Nous présentons dans la figure 21 les activités associées à ce sous-processus.

#### 4.5.5. Sous – processus 5 : Gestion de la capacité suite au calcul de besoins nets

Pour donner suite au CBN conduit dans l'ERP il est nécessaire d'effectuer quelques modifications sur le plan de base pour l'ordonnancement. Nous présentons dans la figure 22 les activités associées à ce sous-processus.

Une fois le CBN lancé, le chef planificateur calcule les charges pour chaque poste de charge de l'entreprise (calcul de charges détaillées) (5.1 – T1). Ce calcul est fait à partir des ordres planifiés par le CBN. Il est nécessaire à ce point de comparer la charge et la capacité dans tous les postes de charge (5.2 – T1) et de vérifier les conditions de surcharge (5.3 – T1). S'il y a des conditions de surcharge, le responsable de production propose des solutions pour les éviter (5.4 – T1) et le calcul de charges doit être lancé à nouveau après avoir incorporé les modifications. Si les conditions de capacité dans tous les postes de charge sont validées (5.5 – T1), le responsable ordonnancement fait un suivi des flux des charges (contrôle des entrées et sorties)

(5.6 – T1) et du flux des inventaires des produits finis (5.9 – T1) suite au processus d'ordonnancement détaillé (7 – T1).

Le suivi des flux de charges permet de comparer la charge planifiée avec la production réelle (charge réelle). Ce rapport constitue l'entrée de l'analyse d'adhérence du PDP (5.7 – T1). Indicateur qui est communiqué dans la réunion PDP de la semaine suivante.

Le suivi de flux des inventaires de produits finis (5.8 – T1) permet au chef planificateur d'analyser l'état des inventaires de produits finis (5.9 – T1) et de communiquer la valeur de cet indicateur dans la réunion PDP de la semaine suivante.

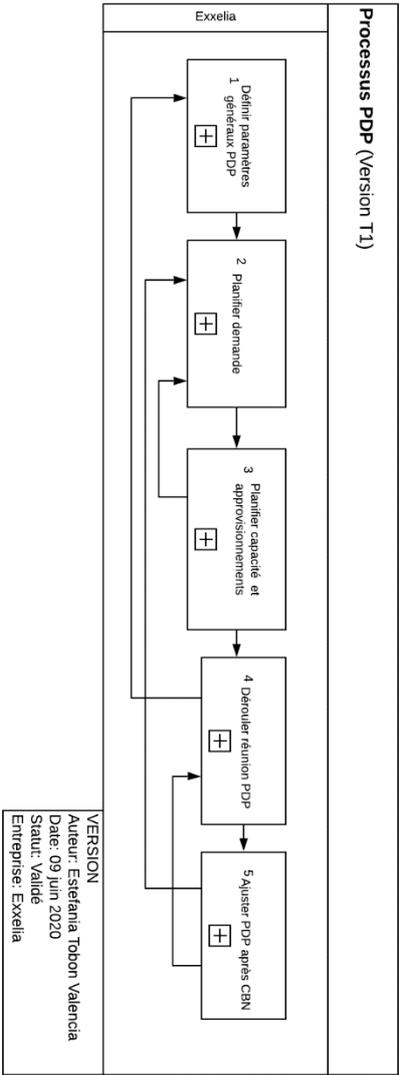


Figure 17 : Processus PDP T1

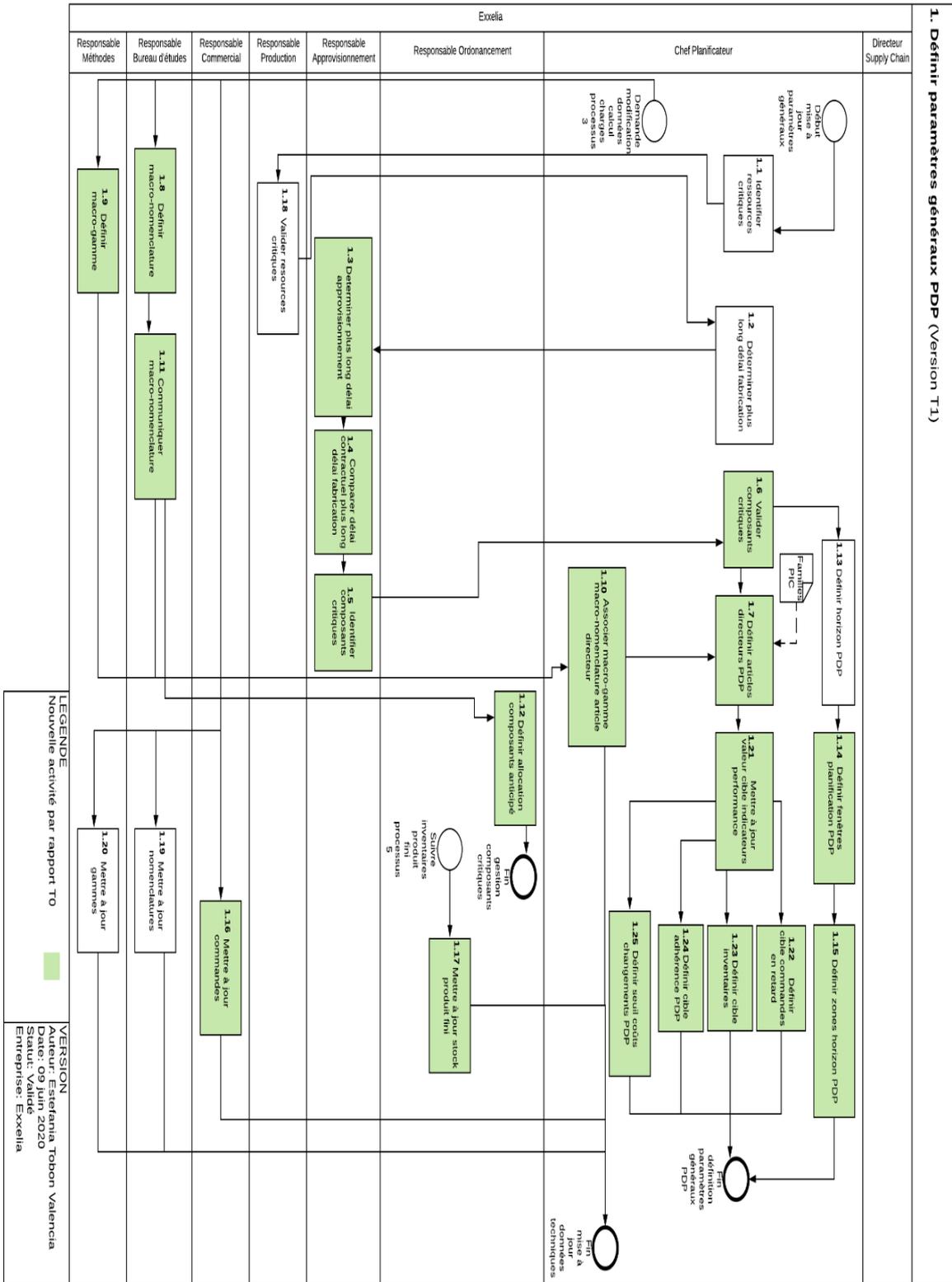


Figure 18 : Définition des paramètres généraux PDP (T1)





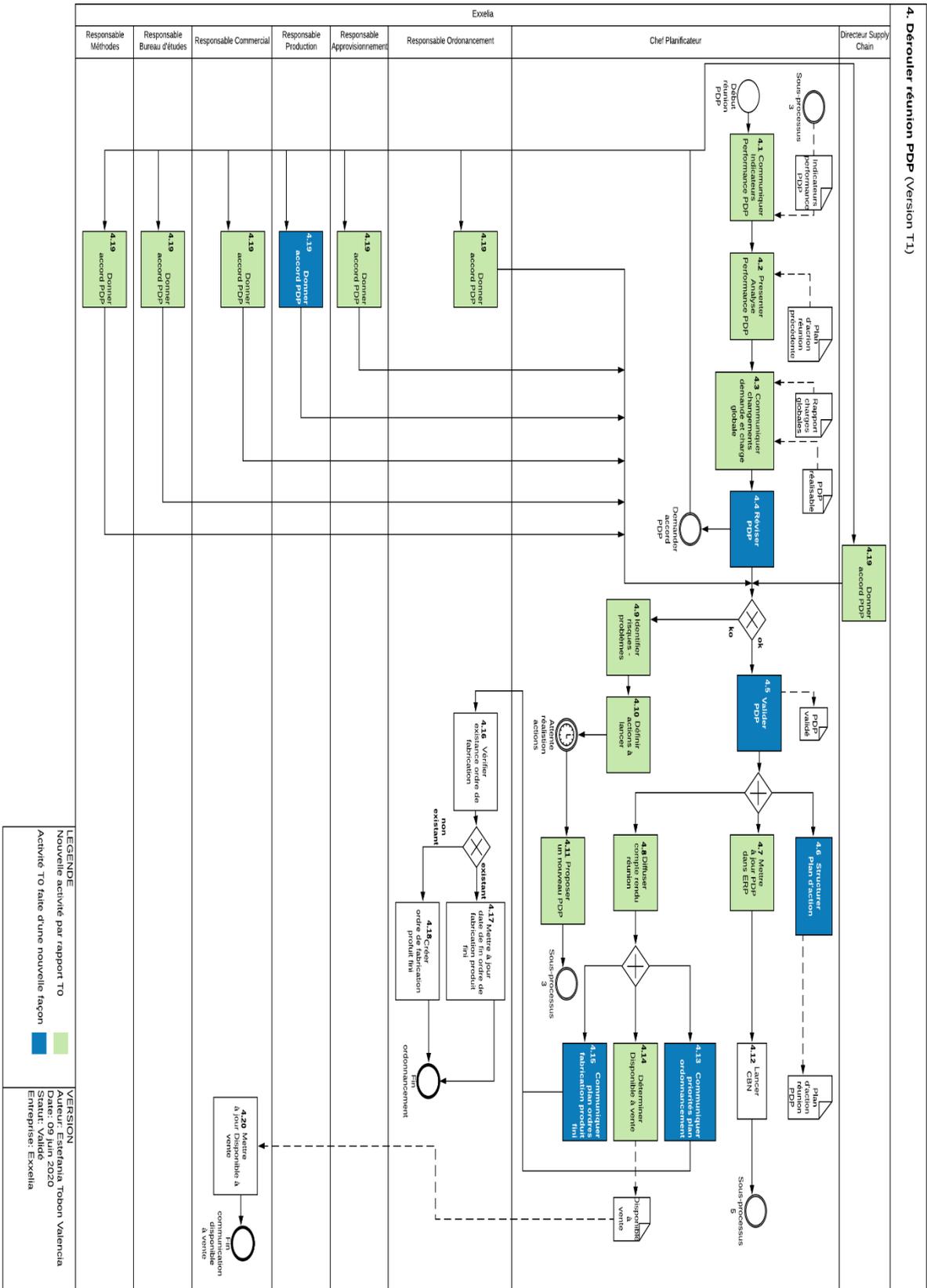


Figure 21 : Réunion PDP (T1)

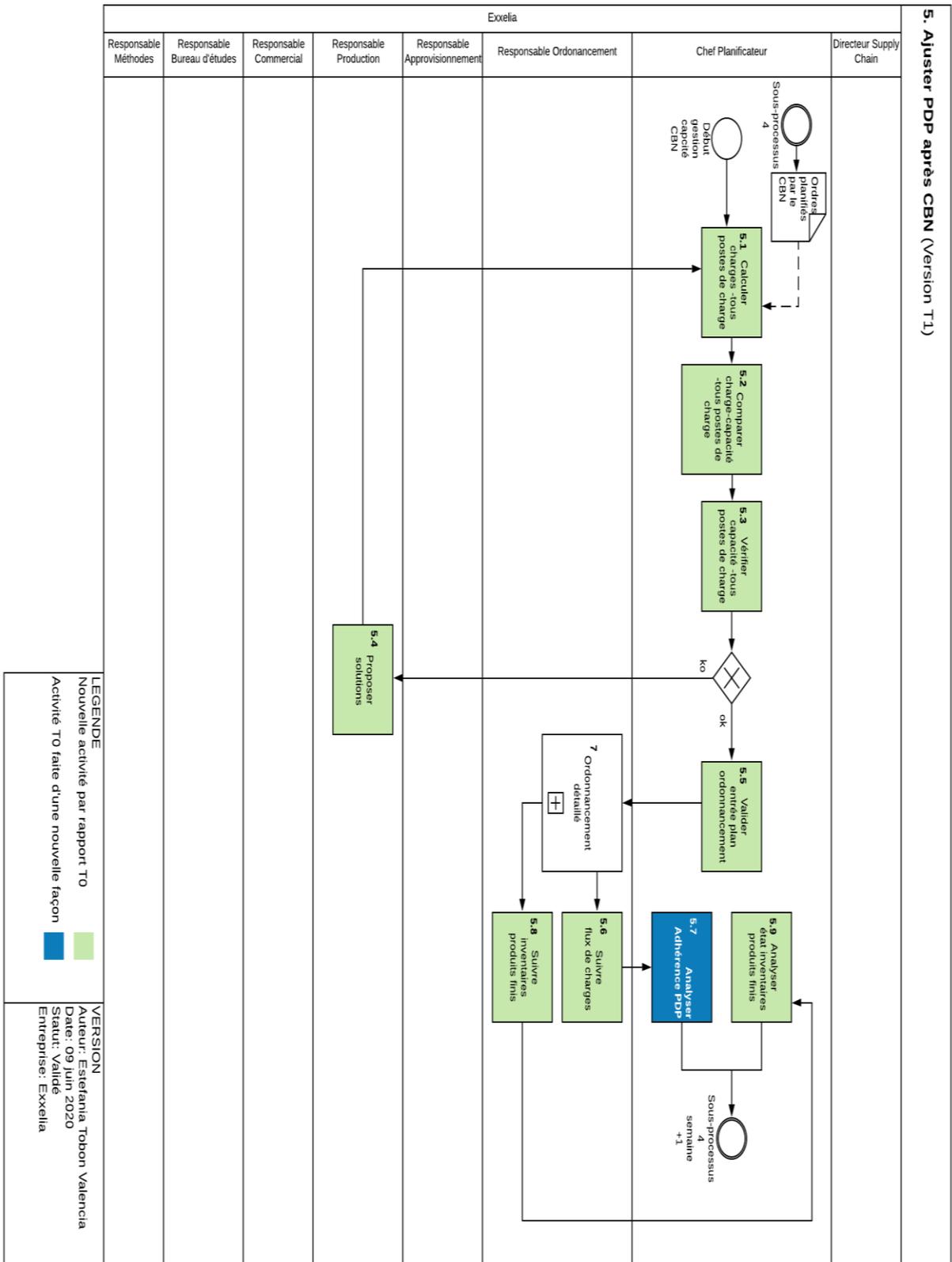


Figure 22 : Ajuster PDP après CBN

#### 4.5.6. Identification tâches modèles « T0 » dans modèle « T1 »

Nous avons identifié les tâches du processus actuel, modèle « T0 » dans les processus standardisés, modèle « T1 » avec un fond bleu. La relation des activités est présentée dans le tableau suivant :

ID activité modèle T0	ID activité modèle T1 (processus. activité)
1.13 et 1.14	1.19
1.3	1.20
Définis hors processus	1.1
	1.18
	1.2
	1.13
1.1	2.3 et 2. 4
1.13	3.5 et 3.6
1.15	3.2
3	6
1.17	3.15
1.16	3.16
1.19	3.14
1.20	4.15
1.24	4.19
1.21	4.16
1.22	4.17
1.23	4.18
1.25	4.5
1.26	4.12
2.1	3.10
2.8	3.12
1.30	3.38
1.31	3.39
1.32	4.9
1.33	4.10
1.27	2.5
4	5.7
1.29	3.25 3.28, 3.29

Tableau 11 : Relation tâches modèles PDP actuel (T0) et PDP mature (T1)

## 4.6. PDP Tn ou PDP 4.0

À l'aide des groupes technologiques 4.0 nous cherchons à présent de rendre le processus PDP T1 agile. Nous avons considéré les dix groupes technologiques qui ont été identifiés par le CEFRIO (2016) comme piliers de la quatrième révolution industrielle, soit : les systèmes cyberphysiques, l'internet des objets, l'infonuagique, les sciences des données, la cybersécurité, les robots/machines autonomes, la réalité virtuelle, les systèmes de simulation, les technologies de communication entre machines et l'intelligence artificielle.

Dans un premier temps nous avons identifié les activités qui pouvaient exploiter des groupes technologiques 4.0 dans les modèles T1 à l'aide de la revue de la littérature que nous avons présentée dans le premier chapitre de cette thèse- État de l'Art. Ensuite, nous nous sommes inspirés de cas d'application des technologies 4.0 retrouvés dans cette revue de la littérature pour proposer une première version du PDP 4.0. Nous avons modélisé l'association de ces technologies aux activités PDP – T1 à l'aide de la méthodologie BPMN. Nous avons ajouté un couloir aux modèles T1 que nous avons nommé « Technologies 4.0 ». Nous avons déplacé les activités qui exploitent des groupes technologiques 4.0 dans ce couloir. Nous avons également ajouté le symbole suivante ☁ sur le coin inférieur droite de ces activités.

À ce point, nous avons invité un groupe de six experts en industrie 4.0 à deux ateliers de travail collaboratif pour améliorer cette version. Lors de séances de travail avec les experts, nous avons étudié chaque sous-processus PDP. Nous présentons par la suite une synthèse de ce travail et les modèles de chaque sous-processus PDP 4.0.

### 4.6.1. Synthèse Atelier PDP 4.0

Nous avons conservé les 5 sous-processus que nous avons présentés dans le processus T1. Nous présentons la relation entre ces sous-processus dans la figure 23.

#### 4.6.1.1. Définition des paramètres généraux PDP

Lors de l'atelier avec les experts, nous avons associé des groupes technologiques 4.0 à quatre activités décrites dans le modèle T1 pour ce sous-processus. La figure 24 présente le modèle BPMN pour la définition des paramètres généraux du PDP en version Tn.

Pour l'identification des ressources critiques (activité 1.1 - Tn), les experts ont proposé d'exploiter la simulation pour générer différents scénarios des flux de production. La simulation permet d'évaluer l'impact des perturbations dans l'atelier, telles que les pannes machines, l'absentéisme des collaborateurs, le repositionnement des opérateurs dans différents postes de charge, entre autres. L'exploitation des données des flux de production en temps réel permet d'évaluer les scénarios de production dès que des anomalies sont détectées pour déterminer si de nouveaux goulets apparaissent. Ainsi, à l'aide d'algorithmes d'optimisation il sera possible d'évaluer la probabilité d'un poste de charges à devenir goulet et de mieux identifier les ressources critiques à partir des contraintes capacitaires et de fabrication.

Si les fournisseurs permettaient à l'entreprise d'avoir accès aux délais d'approvisionnement renseignés dans leurs systèmes d'information, il serait possible de comparer les délais contractuels d'approvisionnement au plus long délai de fabrication renseigné dans l'ERP de l'entreprise avec des données plus fiables. Les experts ont proposé de récupérer les données de délais d'approvisionnement renseignés par les fournisseurs à travers une plateforme dans le nuage permettant de stocker les données des différents systèmes d'information. L'utilisation de l'infonuagique et de la cybersécurité ont été proposées pour l'activité 1.4.

La définition des macro-gammes (activité 1.9 - Tn), peut être faite à l'aide de l'intelligence artificielle- apprentissage automatique (machine learning) ou des techniques de segmentation simple. Les experts ont remarqué que l'exploitation de ces techniques permettrait de capitaliser les connaissances et l'expérience de responsables méthodes et production qui sont très utilisées lors de la définition de macro-gammes. Pour développer cette activité à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique, il est indispensable d'avoir une base de données de temps de fabrication et de réglage suffisamment grande pour la proposition de macro-gammes plus correcte.

Les mêmes techniques ont été proposées par les experts pour définir les macro-nomenclatures (activité 1.8 - Tn). En plus des données de flux de production, cette activité nécessite des données des délais d'approvisionnement des fournisseurs pour identifier les composants critiques. Les experts ont précisé que même si les activités 1.8 - Tn e 1.9 – Tn, font recours à des données de flux de production en temps réel, ceci n'implique pas pour autant que les macro-

gammes et les macro-nomenclatures soient mises à jour en temps réel. La fréquence de mise à jour de ces paramètres doit être définie par l'entreprise.

À différence du modèle T1, les experts ont proposé de mettre à jour du stock de produits finis (activité 1.17 – Tn) par une base de données de l'inventaire de produit fini en temps réel. Nous détaillerons l'activité permettant de recueillir ces données dans le sous-processus 5 – Tn.

Deux nouvelles activités par rapport au modèle T1 ont été ajoutées pour donner suite à l'atelier avec les experts. Ces activités sont : la vérification des flux de production en temps réel (activité 1.18 - Tn) et la vérification de la disponibilité de composants (activité 1.26 - Tn). Les données de flux de production peuvent être récupérées à travers l'internet des objets (IdO) ou bien des systèmes cyberphysiques. L'accès à ces données permet de comparer la quantité planifiée versus la quantité fabriquée, jusqu'au présent contrôlé par des techniques comme le Kanban ou CONWIP, et d'intégrer les niveaux de contrôle de la production, planification et exécution.

Similairement, les fournisseurs pourraient extraire les données relatives à la date d'expédition des commandes à l'aide de l'une de ces technologies. À travers des plateformes dans le nuage (infonuagique) ils pourraient mettre à disposition des clients les informations relatives aux délais d'approvisionnement.

Les experts ont signalé que les données associées aux changements effectués sur les gammes et macro-nomenclatures (activités 1.19 et 1.20 - Tn), pourraient être stockés dans une base des données pour entraîner des algorithmes d'apprentissage automatique pour l'activité 1.10 - Tn. L'association ou mise à jour des gammes et macro-nomenclatures aux articles directeurs pourrait devenir une activité automatisée à travers l'apprentissage automatique.

Par rapport au modèle T1 nous avons uniquement enlevé une activité de ce sous-processus, valider les ressources critiques (activité 1.18 - T1). Cette activité a été incorporée dans l'activité 1.1 – Tn.

#### 4.6.1.2. Planifier la demande

Nous présentons dans la figure 25 la version Tn du sous-processus 2, Planifier la Demande. Dans ce sous-processus uniquement l'activité 2.6 – Tn, consolider la demande des articles directeurs a été associé à l'un des groupes technologiques 4.0. Les experts ont proposé d'utiliser l'IA avec la technique d'apprentissage automatique. Cette activité a comme données d'entrée la demande (commandes en retard, commandes fermes, besoins non confirmés), les prévisions de demande (le plan de ventes du PIC désagrégé au niveau des articles directeurs) et de données macro-économiques sensibles d'avoir un impact sur les prévisions de la demande. Chaque entreprise doit identifier les données macro-économiques sensibles d'engendrer des augmentations ou des baisses dans les prévisions de vente. Un algorithme d'apprentissage automatique facilitera l'analyse de ces facteurs lors de la définition des prévisions de demande du PDP.

L'utilisation de l'apprentissage automatique dans l'activité 2.6 – Tn, permet d'identifier des tendances quantitatives et qualitatives dans la demande. De plus, l'utilisation de méthodes statistiques avancées permet de faire des prévisions sur la demande future.

L'emploi d'algorithmes d'optimisation a été jugé pertinent par les experts lors de la mise à jour de la date d'expédition des commandes fermes et des commandes en retard (activités 2.5 et 2.8 – Tn).

Une nouvelle activité a été incorporée à ce sous-processus, vérifier le flux de production en temps réel (activité 2.9 – Tn). Les données de flux de production récupérés à l'aide des systèmes cyberphysiques ou de l'internet des objets peuvent être exploitées pour calculer les nouvelles dates d'expédition de commandes en retard (activité 2.8 – Tn) et pour mettre à jour la date d'expédition des commandes fermes. Ceci permet au chef planificateur d'estimer les changements dans les dates d'expédition sur une base très proche de la réalité de l'atelier de fabrication. De plus, l'association des données de la demande aux flux de production en temps réel lui permet de faire une allocation optimale des ressources pour faire face aux variations de la charge.

#### 4.6.1.3. Planifier la capacité et les approvisionnements

Nous présentons dans la figure 26 le modèle de ce sous-processus. Au travers l'intégration des groupes technologiques 4.0, nous avons proposé une nouvelle façon d'exécuter 13 activités par rapport au même sous-processus en version T1.

Pour déterminer la cause d'une mauvaise performance du PDP de la semaine précédente (3.3), les experts ont proposé d'utiliser l'apprentissage automatique. La mauvaise performance du PDP peut être engendrée par un processus PDP erroné, une erreur des données d'entrée ou un problème avec la valeur des paramètres du PDP. Pour pouvoir exploiter l'apprentissage automatique, il est nécessaire d'alimenter l'algorithme avec des données associées aux causes de la mauvaise performance. Ainsi, l'algorithme pourra proposer une solution en fonction de la bonne cause.

Si l'algorithme d'apprentissage automatique associe le problème à la capacité, la simulation peut être exploitée pour proposer différents scénarios de mise à jour de capacité (sous-processus 6 – Tn). Ensuite, le responsable de productions peut sélectionner le meilleur parmi ces scénarios à l'aide des outils d'optimisation (activité 3.15 – Tn).

Si l'algorithme d'apprentissage automatique détermine que la cause de la mauvaise performance du PDP est associée aux données de charge, la simulation peut être au service de l'activité 3.5 – Tn, pour proposer des modifications sur les macro-gammes ou sur les macro-nomenclatures. Les données de flux de production, récupérées à travers l'IdO ou systèmes cyberphysiques (activité 3.10 – Tn), permettront de mieux paramétrer les temps alloués aux différentes macro-gammes.

L'IdO peut aussi être utile lors de la vérification de la disponibilité des semi-finis ou des approvisionnements fabriqués en interne (activité 3.11). Quant à la vérification de la disponibilité des composants, matières premières ou produits semi-finis approvisionnés des fournisseurs (activité 3.12 – Tn), l'utilisation de l'IdO ou des systèmes cyberphysiques avec de l'infonuagique a été proposée. L'analyse des niveaux d'inventaire des composants (activité 3.14 – Tn) pourrait exploiter l'apprentissage automatique pour faire des prévisions sur la disponibilité des matières dans l'entrepôt.

Lors de la proposition du PDP (activité 3.2 - Tn), les experts ont remarqué que l'exploitation de la simulation avec des outils d'optimisation permet d'obtenir un PDP en considérant plusieurs contraintes : rapport charge-capacité, utilisation optimale de la capacité disponible, décalage des dates d'expédition des commandes, augmentation-diminution de la capacité, entre autres. À l'aide de la simulation, plusieurs scénarios PDP peuvent être proposés. Ensuite, des approches d'optimisation (heuristiques, métaheuristiques ou hybrides) permettront de valider les scénarios à partir des différents objectifs définis dans le processus PDP pour le niveau d'inventaires, les coûts d'inventaires, le retard, le licenciement et embauche, la cadence de production, le temps total de production et l'utilisation de la capacité.

L'activité 3.2 -Tn peut être complètement automatisé et proposer un PDP réalisable qui soit importé dans l'ERP (3.20 -Tn). Une autre alternative est de faire de cette activité un outil d'optimisation pour le support dans la prise des décisions. Dans ce cas, plusieurs PDP avec des valeurs des indicateurs de performance associés seraient proposés en sortie de l'activité 3.2 – Tn, pour ensuite permettre au chef planificateur de choisir la meilleure alternative du PDP en fonction des contraintes de production du moment. Le chef planificateur pourra ensuite effectuer des modifications à partir de ses connaissances (3.19 - Tn). Le choix parmi ces deux niveaux 4.0, automatisé et optimisé, dépendra du niveau de capacité recherchée par l'industriel avec le 4.0.

Les variations capacitaires issues de l'activité 3.2 - Tn peuvent être stockées dans une base des données et associées à des coûts. Des coûts associés aux modifications des dates d'expédition des commandes (variations charge) peuvent être récupérés pour donner suite aux activités 3.18 et 3.2 - Tn. Les coûts des variations capacitaires, de repositionnement de la charge et du retard sont exploités dans l'activité 3.27 - Tn, détermination des coûts associés aux changements PDP. Cette activité peut être faite à l'aide de l'IA-apprentissage automatique pour estimer les coûts des changements associés au PDP. La sortie de cet algorithme sera un coût estimé, plus ou moins proche du coût réel en fonction de la quantité des données d'entrée. Toutefois, les coûts des modifications PDP peuvent être estimés à l'aide d'algorithmes de calcul simple qui utilisent comme données d'entrée : les coûts des variations capacitaires, les coûts de variations de la charge, les coûts associés aux inventaires des produits finis (par l'avancement dans la fabrication) et les coûts associés au retard.

Suite à la mise à jour du PDP dans l'ERP, le calcul du disponible à vente peut être fait à l'aide d'algorithmes de calcul simple (activité 3.2 - Tn). La planification des dates de début et de fin des ordres de fabrication de produits finis (activité 3.24 – Tn), peut être faite avec la simulation pour incorporer les variations capacitaires de charge. L'exploitation des approches d'optimisation sera ensuite nécessaire pour choisir le meilleur plan d'ordres de fabrication en fonction des objectifs de l'entreprise.

Le calcul de la valeur du retard (activité 3.26 – Tn), peut être fait avec de l'apprentissage automatique. Il s'agit d'une prédiction qui considère beaucoup de contraintes et de scénarios associés à des perturbations. L'utilisation d'une approche hybride, d'apprentissage automatique avec un algorithme heuristique ou métaheuristique, permettrait de diminuer le retard et de déterminer la priorité de traitement des ordres de fabrication (activité 3.25 – Tn). L'approche d'optimisation permettrait de vérifier la faisabilité du plan.

Plusieurs activités du modèle T1 pour ces sous-processus ont été incorporées comme contraintes et étapes de calcul de l'activité 3.2. Ces activités sont : 3.14, 3.15, 3.16, 3.18, 3.26, 3.27, 3.37, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.30 – T1.

#### 4.6.1.4. Dérouler la réunion PDP

Dans ce sous-processus peu d'activités peuvent bénéficier de l'exploitation des groupes technologiques 4.0. La figure 27 présente la version Tn de ce sous-processus.

Uniquement deux activités ont été associées à des groupes technologiques 4.0, l'identification des risques et problèmes associés au PDP (activité 4.9 – Tn) et la définition des actions à lancer (activité 4.10 – Tn). L'utilisation de l'apprentissage automatique pour l'activité 4.9 nécessite d'une base des données « causes de problèmes ». Cette base des données permettra à l'algorithme d'identifier le problème associé au PDP proposé. De façon similaire, l'activité 4.10 nécessite d'une base de données des « solutions préalables » pour permettre à l'algorithme de proposer une solution au problème ou risque détecté dans l'activité précédente. Cette base des données peut être alimentée aussi par des solutions proposées par les participants lors de la réunion.

Certaines activités ont été supprimées par rapport au modèle T1. Les activités de communication priorités ordonnancement, détermination du disponible à vente et

communication de plan des ordres de fabrication du produit fini (4.13, 4.14 et 4.15 – T1) ont été incluses dans le sous-processus 3. Les activités associées aux vérifications et mises à jour des ordres de fabrication de produit fini (activités 4.16, 4.17, 4.18 – T1) ont été incluses dans le sous-processus 5.

#### 4.6.1.5. Ajuster le PDP suite aux calculs CBN

La plupart des activités de ce sous-processus ont été associées à des groupes technologiques 4.0. Le modèle de ce sous-processus est présenté dans la figure 28.

Le calcul et la validation de charges dans tous les postes de charge (activités 5.1 et 5.2- Tn) peuvent utiliser la simulation pour étudier différents scénarios du rapport charge-capacité. L'exploitation des algorithmes de logique floue et/ ou heuristiques permettront de sélectionner le meilleur scénario. Des données de la maintenance et des flux de production en temps réel s'avèrent indispensables pour l'analyse de charge détaillée.

Si l'analyse des charges détaillées ne satisfait pas les objectifs de l'entreprise, la proposition de solutions (activité 5.3 – Tn) peut utiliser l'apprentissage automatique. Cet algorithme nécessite un historique des conditions de charge-capacité et d'une base de données des solutions proposées pour les cas de surcharge. Il pourra proposer une solution adaptable à la situation de déséquilibre charge-capacité.

Une fois les solutions proposées, la validation (5.10 – Tn) peut s'en servir de la simulation pour analyser l'impact de la mise en place de solutions dans la production.

Si l'analyse des charges détaillée permet d'atteindre les objectifs de l'entreprise, la validation du plan d'entrée de l'ordonnancement (activité 5.5 – Tn) peut être faite par le chef planificateur à l'aide d'une approche d'optimisation. Une approche d'optimisation lui permettrait de sélectionner le meilleur scénario parmi ceux issus de l'activité 5.4 - Tn.

Dans le sous-processus d'ordonnancement (sous-processus 7 – Tn), la simulation par jumeau numérique avec des approches d'optimisation a été proposée par les experts.

Pour le pilotage des flux de production (activité 5.6), l'exploitation de l'IdO ou des systèmes cyberphysiques permettent de faire un suivi de flux de production en temps réel. Le pilotage

des flux de production permet de collecter des informations sur la position de chaque ressource, les temps de cycle de chaque poste de charge, le temps d'inactivité des ressources et les arrêts de production.

Les experts ont proposé d'exploiter l'IdO ou des systèmes cyberphysiques pour suivre la position des produits en temps réel (activité 5.7 – Tn). Les données issues de cette activité permettront de mettre à jour les données des inventaires de produits finis dans l'ERP (activité 5.9 – Tn). Ils peuvent être exploités aussi comme données d'entrée d'un algorithme de calcul d'adhérence du PDP (activité 5.8 – Tn).

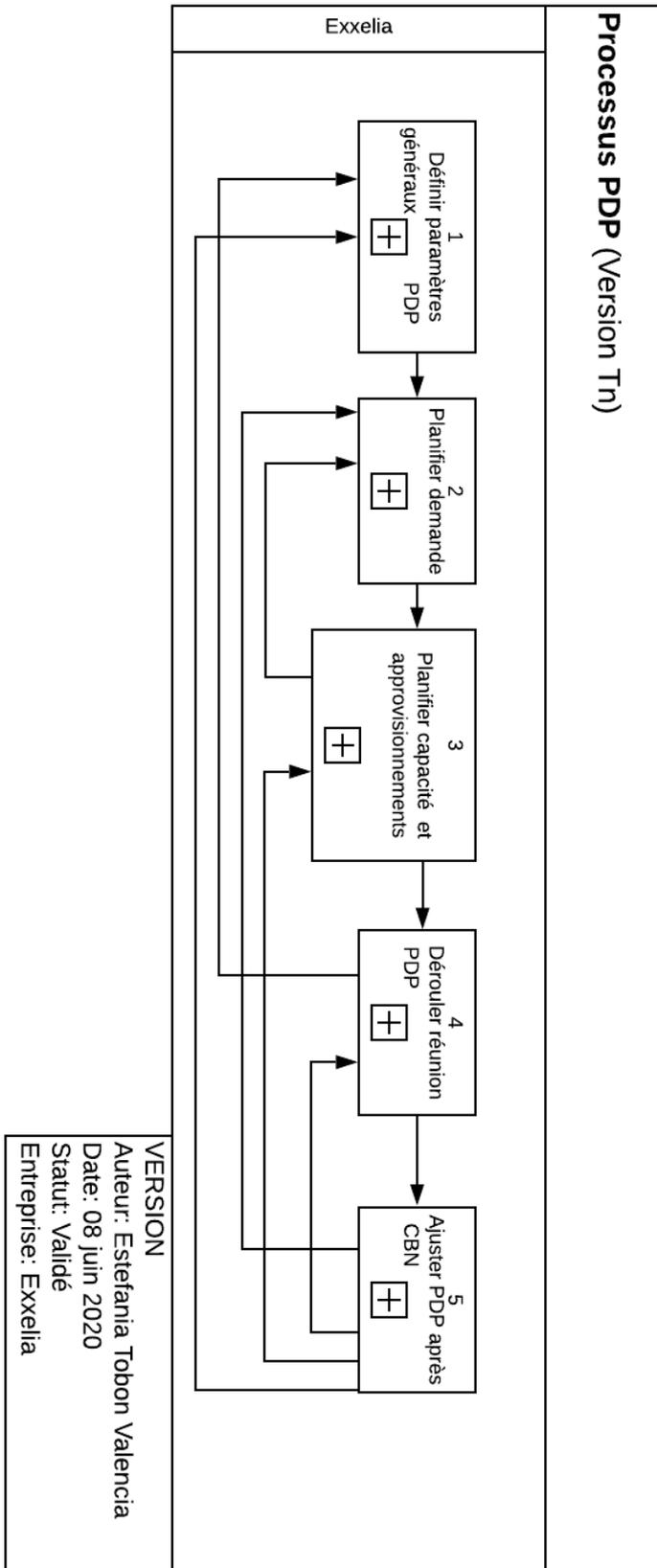


Figure 23 : Processus PDP Tn



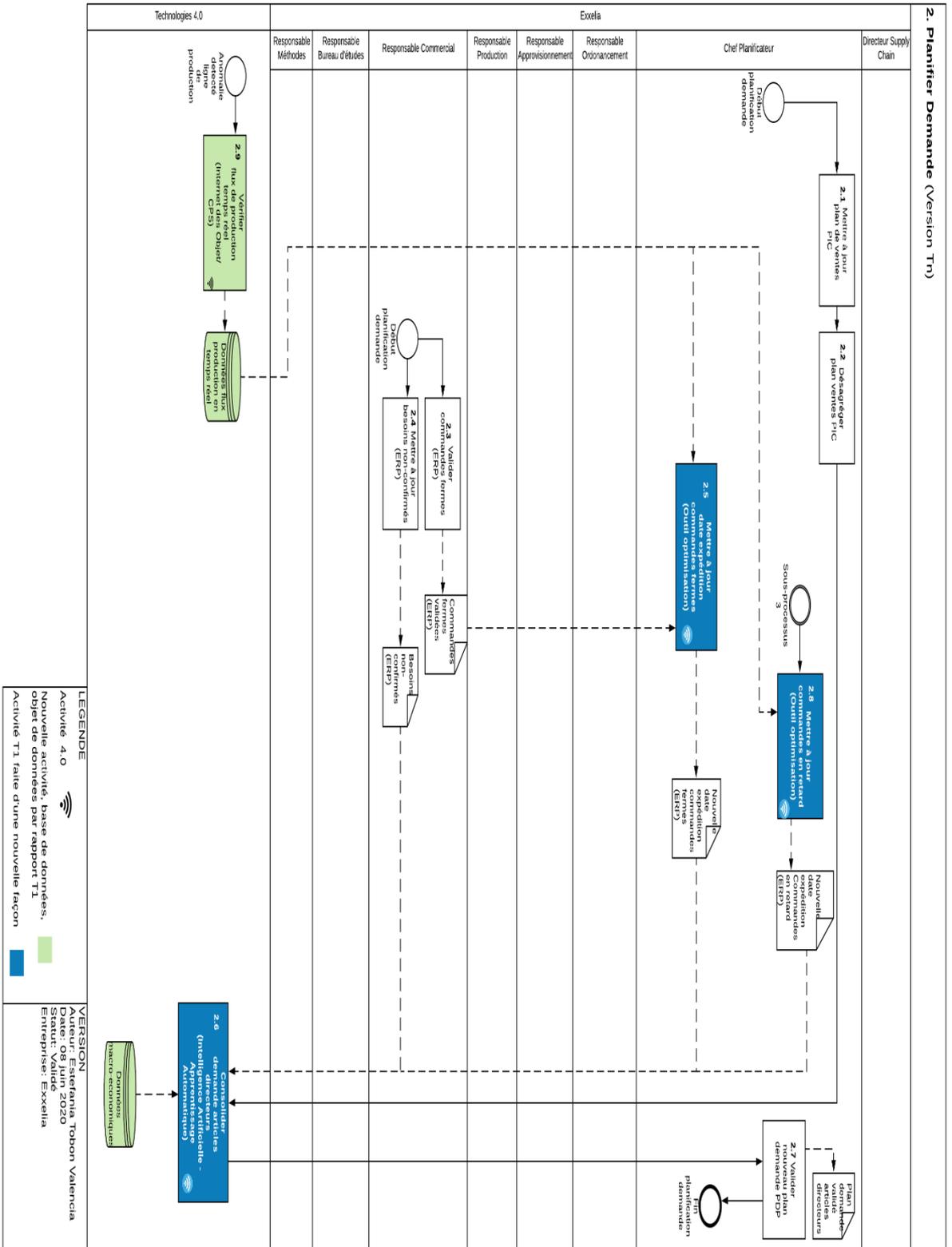


Figure 25 : Planifier la demande (Tn)



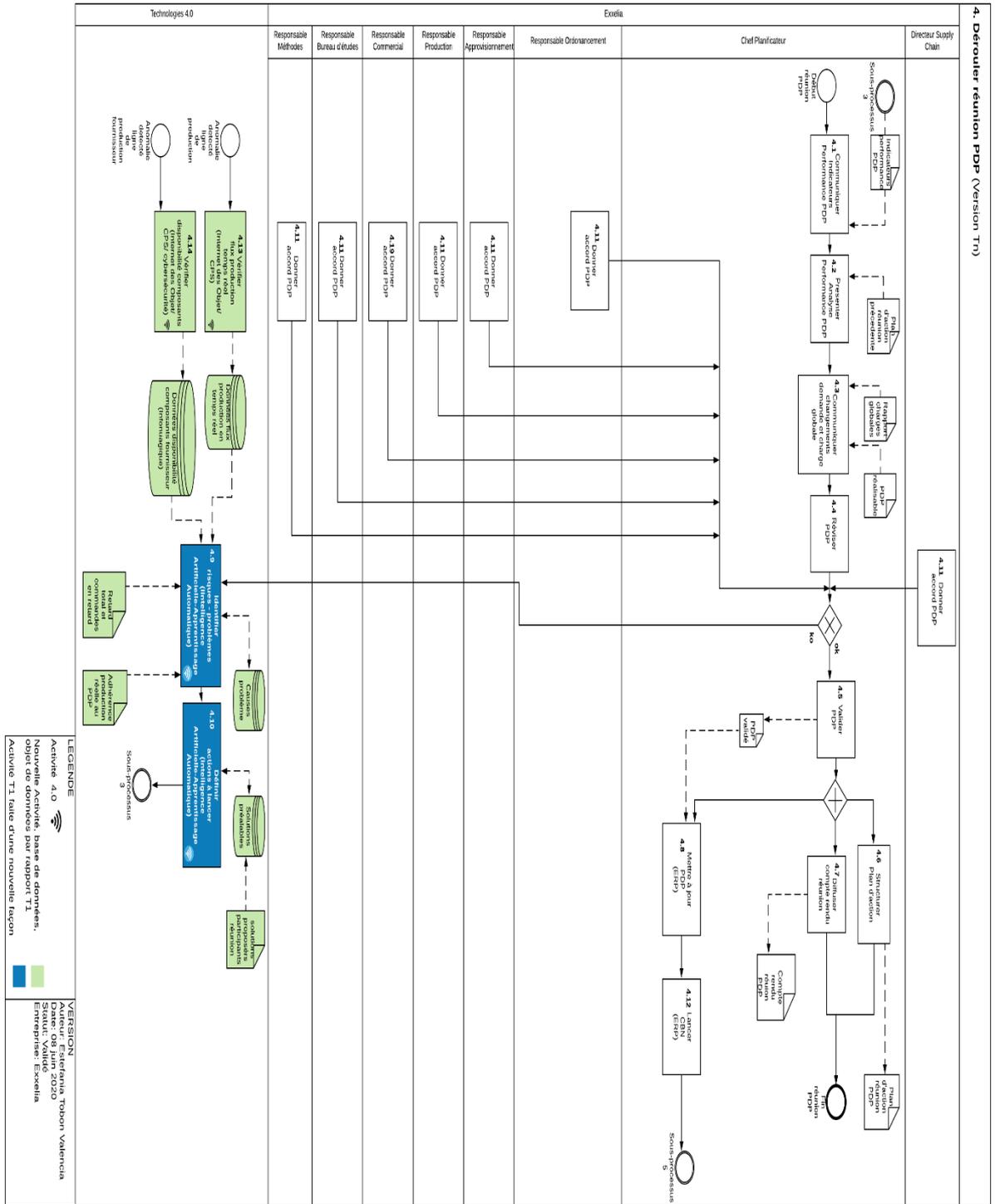


Figure 27 : Réunion PDP (Tn)



#### 4.6.2. Discussion des résultats Tn

L'atelier avec les experts nous a permis d'identifier deux axes d'amélioration principaux pour le PDP à l'aide des groupes technologiques 4.0. Ces axes sont associés à la surveillance et à l'optimisation.

Le premier axe concerne la fiabilisation des données d'entrée (paramètres du processus). Le pilotage des flux de production en temps réel permet d'une part de baser les prévisions sur des données plus proches de la réalité et d'une autre part d'améliorer la réactivité des plans face aux aléas de production.

Cet axe est associé à la surveillance. Pour les activités du PDP associées à ce niveau, l'IdO et les systèmes cyberphysiques ont été les groupes technologiques privilégiés par les experts pour récupérer les données en temps réel.

Une autre technologie 4.0 que les experts ont associée au niveau de surveillance est l'infonuagique. La récupération des données des systèmes d'information des fournisseurs, comme les dates de réception des approvisionnements, pourrait être faite en temps réel à l'aide de cette technologie. Les experts ont aussi signalé l'importance d'utiliser la cybersécurité pour accéder aux informations dans le nuage et protéger les systèmes d'information propres à l'entreprise, mais aussi ceux des fournisseurs.

D'autres utilités de l'infonuagique dans le processus PDP évoqué par les experts concernent :

- Le stockage des données de flux de production lorsque l'entreprise manque d'espace dans ses serveurs ou bien lorsque la puissance de calcul de l'entreprise pour les simulations et les calculs d'optimisation ne sont pas suffisants ; et
- Lors de la planification d'un réseau de production distribué géographiquement, pour permettre d'accéder aux données de flux de production en temps réel des tous les sites de fabrication.

Le deuxième axe d'amélioration comporte l'exploitation des technologies 4.0 pour l'optimisation et le support dans la prise de décisions associées au PDP. La Simulation est la technologie que les experts ont privilégiée pour ce niveau de capacité. Les experts ont remarqué

que l'exploitation des approches d'optimisation heuristiques et métaheuristiques s'avérait indispensable pour permettre de faire un choix parmi les scénarios proposés par la simulation.

L'apprentissage automatique a été employé aussi pour supporter la prise des décisions. Cette technique a été associée à des activités du PDP uniquement lorsque le décideur n'était pas capable de modéliser l'influence des différents paramètres sur l'objet qu'il cherche à calculer, par exemple dans la consolidation des prévisions de la demande (activité 2.6 – Tn). Étant donné que dans le processus du PDP le système et la valeur de paramètres sont souvent connus, l'apprentissage automatique a été très peu utilisé.

L'intégration des niveaux de surveillance et d'optimisation dans le processus PDP à travers les groupes technologiques que nous avons cités dans les paragraphes précédents nous a permis d'identifier avec les experts quelques activités du modèle T1 qui n'étaient plus pertinentes dans le PDP - Tn. Notamment, l'exploitation de la simulation avec des approches d'optimisation dans l'activité 3.2 – Tn, Proposer PDP, nous a permis d'incorporer les activités 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.26, 3.27, 3.37 et 3.19 – T1 dans cette activité. Ainsi, le rapport charge-capacité, les variations capacitaires et le repositionnement des commandes ont été considérés comme contraintes d'optimisation de l'activité 3.2 – Tn.

Mis à part de l'exploitation de l'IdO, les systèmes cyberphysiques, la cybersécurité et l'infonuagique pour les activités de pilotage des flux et de la simulation couplée avec des algorithmes d'optimisation ou de l'apprentissage automatique pour le support dans la prise de décisions, les experts ont jugé qu'il n'était pas nécessaire d'associer d'autres groupes technologiques 4.0 aux activités du PDP. La faisabilité du plan est la condition principale que le groupe d'experts a associée au processus PDP. En conséquence, ils considèrent qu'il est possible d'exploiter certaines technologies 4.0, mais il est essentiel de laisser la place à la prise des décisions des différents acteurs du processus PDP.

Parmi les cinq sous-processus PDP que nous avons proposés, la planification de la capacité et des approvisionnements et ajustement du PDP pour donner suite aux calculs CBN, comportaient un nombre supérieur d'activités associées à la surveillance et à l'optimisation. Dans ces deux sous-processus (3 et 5 Tn), l'association des groupes technologiques aux activités a été en conséquence plus élevée par rapport aux autres sous-processus.

Le déroulement de la réunion PDP (sous-processus 4 Tn) est constitué par un grand nombre d'activités associées à la prise des décisions. Ces décisions sont associées à des activités exécutées majoritairement dans les sous- processus 3 et 5. En conséquence, le nombre d'activités que les experts ont jugé comme sensible d'exploiter des technologies 4.0 a été réduit.

L'atelier de travail avec les experts nous a permis de proposer une nouvelle façon de faire à l'aide des groupes technologiques 4.0 pour un nombre d'activités considérable dans le processus PDP. A l'aide des experts, nous avons donné de la robustesse aux paramètres du PDP à travers le niveau de surveillance. Le niveau d'optimisation nous a permis de transformer les activités de calcul pour mieux supporter les processus de prise de décisions.

La version Tn du processus PDP que nous avons proposée avec les experts ne comporte pas un processus PDP automatisé. Les modèles des différents sous-processus Tn permettent de confirmer que les interlocuteurs sont indispensables pour l'exécution des activités associées à la prise de décisions.

## 4.7. Conclusion

Notre premier objectif était de proposer un standard pour le processus PDP de notre partenaire industriel. Nous avons d'abord modélisé le processus PDP actuel (modèles T0). La cartographie de ce processus nous a permis de confirmer que de nombreuses activités clés du processus PDP n'étaient pas abordées dans la pratique de planification de notre partenaire industriel. Uniquement deux sous-processus parmi les cinq que nous avons proposés sont abordés actuellement, la planification de la capacité et des approvisionnements et l'ajustement du PDP après le CBN. Cette cartographie nous a permis de constater aussi que le processus PDP actuel ne présente aucune dimension de l'agilité.

A travers la modélisation du PDP T1 nous avons indiqué les activités, la séquence des activités, le rôle de chaque intervenant et le processus de prise de décisions du PDP. Nous avons ainsi proposé un standard pour un processus PDP mature divisé en cinq sous-processus, définition des paramètres généraux du PDP, planification de la demande, planification de la capacité et des approvisionnements, réunion PDP et ajustement du PDP pour donner suite au CBN. Les modèles de sous-processus PDP T1 font preuve de la complexité de ce processus, ainsi que de

l'importance d'identifier les actions de chaque partie prenante et d'exploiter des outils informatiques pour supporter la prise de décisions.

Postérieurement, nous avons conçu des modèles intégrant des groupes technologiques 4.0 aux activités du PDP à l'aide d'un groupe d'experts (modèles sous- processus Tn). L'association des technologies 4.0 aux activités du PDP s'est centrée sur deux niveaux, la surveillance et l'optimisation. Le premier niveau est associé à la fiabilisation des données d'entrée L'IdO, les systèmes cyberphysiques, l'infonuagique et la cybersécurité sont les groupes technologiques qui ont été incorporés aux activités de surveillance. Le deuxième niveau est en relation avec les activités de support dans la prise de décisions. La simulation avec des approches d'optimisation et l'intelligence artificielle – apprentissage automatique, a permis d'atteindre le deuxième niveau.

En fonction de la stratégie 4.0 définie par l'entreprise, l'automatisation des activités associées à la prise de décisions du PDP peut être plus ou moins élevée. Les PDP 4.0 que nous avons proposés concernent le niveau d'optimisation. Les technologies 4.0 permettent de supporter la prise des décisions des différents acteurs à travers l'exploitation des données des flux de production en temps réel et de l'ajustement des plans par le biais de la simulation et des approches optimisation.

A travers l'intégration de certains groupes technologiques 4.0 nous avons proposé un processus PDP 4.0 qui présente trois dimensions d'agilité, à savoir : la flexibilité, la réactivité et l'innovation. La flexibilité a été atteinte à travers l'exploitation de la simulation qui permet d'évaluer la fabrication dans différentes lignes de production. A l'aide des approches d'optimisation, les responsables de la prise de décisions du PDP peuvent sélectionner parmi ces programmes de production celui qui permet d'atteindre les objectifs en respectant les contraintes du système à un moment donné.

La réactivité a été retrouvée à travers l'IdO ou les systèmes cyberphysiques pour piloter les flux de production en temps réel et vérifier la disponibilité des composants, matières premières et sous-ensembles en temps réel. Ces données sont utilisées pour proposer des plans PDP (PDP faisable et le plan d'entrée pour l'activité de l'ordonnancement) qui incorporent les

changements de l'environnement interne (ateliers de production) et externe (fournisseurs) en peu de temps.

L'utilisation de certains groupes technologiques 4.0 nous a permis de proposer une nouvelle façon de faire de certaines activités du PDP. Ceci correspond à l'innovation comme dimension de l'agilité.

Enfin, le PDP 4.0 favorise l'innovation. Des algorithmes d'apprentissage automatique proposent des programmes de production qui amèneront à l'entreprise à produire d'une façon différente. La fabrication au sein de sous-traitants, pourrait être proposée pour résoudre des problèmes de capacité disponible.

Avec les modèles PDP T1 et PDP 4.0, nous avons pu atteindre les objectifs proposés en début de ce chapitre. La proposition d'un standard pour le PDP et l'association des groupes technologiques 4.0 à ce processus.

Le travail que nous avons conduit pour proposer les modèles du PDP 4.0 correspond à la première étape de transition au 4.0. Une perspective de recherche concerne la mise en place de ce processus. À partir des modèles PDP 4.0, les entreprises doivent d'abord sélectionner les technologies à déployer et les mettre en place après. Ensuite, les entreprises devront chercher à améliorer et à faire évoluer le processus. Il sera convenable à ce moment de mesurer les gains apportés par le 4.0 dans le processus PDP et d'identifier les nouvelles activités à améliorer.

Nous avons fondé la modélisation du processus PDP sur les besoins des PME manufacturières. Il serait, en conséquence intéressant de déterminer si le modèle PDP 4.0 que nous avons proposé est transposable à d'autres contextes industriels.

Une autre perspective de recherche concerne la modélisation BPMN 2.0. Le standard nous a permis de modéliser les processus PDP actuels (T0) et PDP mature (T1) sans aucune difficulté. En revanche, lors de la modélisation du processus PDP 4.0, nous avons dû personnaliser l'utilisation des éléments du standard. Ainsi, nous avons créé un couloir des groupes technologiques dans lequel nous avons placé les activités sensibles à devenir 4.0 et nous avons indiqué à l'intérieur des activités le groupe technologique 4.0 à utiliser. Lors de la modélisation

des processus 4.0 il serait important de pouvoir spécifier pour chaque activité le groupe technologique, la portée (surveillance, contrôle, optimisation et automatisation) et la fréquence d'exécution.

L'étude Delphi-Régnier (Chapitre 3) nous a permis d'identifier le processus PDP de notre partenaire industriel. Ce processus révèle un manque d'outils support pour la prise de décisions des chefs planificateurs, un manque de standardisation du processus et l'absence des dimensions de l'agilité. Dans le Chapitre 4, nous avons proposé un processus PDP standardisé (modèles T1) et un processus PDP intégrant les groupes technologiques 4.0 : flexible, réactif et innovant. Notre partenaire industriel n'a pas encore engagé une démarche de transformation numérique, notre objectif est de proposer des solutions adaptables au contexte industriel actuel pour supporter la prise de décisions des chefs planificateurs dans le PDP. Dans les chapitres 5 et 6 nous proposons deux approches d'optimisation (approche exacte et heuristique).

# Chapitre 5 : Outil optimisation PDP -approche de résolution exacte

## 5.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre un outil d'optimisation pour une problématique associée au processus PDP de notre partenaire industriel. L'étude Delphi-Régnier que nous avons présentée dans le troisième chapitre nous a permis d'identifier que les chefs planificateurs retrouvent très souvent des commandes avec un retard dans la date de livraison lors de la planification PDP. De plus, ils manquent d'outils leur permettant de fiabiliser les délais de livraison, de conduire une analyse de charges globales et de diminuer le retard de livraison des commandes clients.

La modélisation du processus PDP actuel (T0) que nous avons présenté dans le chapitre 4 nous a permis de confirmer les difficultés soulevées par l'étude Delphi-Régnier et d'identifier les activités lors desquelles nous pourrions mettre en place notre outil d'optimisation.

Nous avons donc sélectionné un secteur de production de notre partenaire industriel pour pouvoir concevoir notre outil d'optimisation. Le secteur de production d'étude a une stratégie de fabrication d'assemblage sur commande et la fabrication est réalisée par lots sur plusieurs lignes d'assemblage. Le processus de production implique un niveau élevé d'activités manuelles. Les opérateurs présentent des facteurs d'efficacité différents pour effectuer les tâches et, par conséquent, la capacité varie d'un opérateur à l'autre et d'un poste de charges à l'autre.

L'un des principaux objectifs du PDP définis par notre partenaire industriel est d'améliorer le niveau de service à la clientèle. Afin de mesurer la satisfaction des clients, Sawik (2007) propose d'étudier le nombre de commandes clients qui présentent un retard de livraison. En raison de pratiques de planification inappropriées, le secteur de production qui fait l'objet de notre étude ne livre pas toutes les commandes clients à temps. Cette situation a engendré un retard cumulé important dans l'expédition et la livraison des commandes.

Dans les travaux de Proud (1999), l'auteur cite les problèmes suivants, associés à une mauvaise gestion du PDP : perturbations dans l'atelier, retard dans les livraisons clients, retard de

livraison des fournisseurs, heures supplémentaires non planifiées, inventaire d'en-cours élevé, utilisation sous-optimale des ressources, inventaires déséquilibrés, changements d'horaires fréquents et plaintes des clients. Il est en conséquence évident que notre étude de cas présente un problème de gestion PDP.

Un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) est proposé pour minimiser le retard cumulé à l'intérieur de l'horizon de planification. Pour chaque période d'analyse (semaine), le PDP devrait indiquer les quantités à produire en respectant les contraintes capacitaires. Le problème a été modélisé dans GLPK en appliquant le langage de modélisation mathématique GMPL (GNU mathematical programming language).

Le modèle mathématique a été testé grâce à un programme de validation intégré par des tests de différente taille. Le solveur exact de GUROBI a été exploité pour résoudre les tests.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter un outil d'optimisation pour aider le chef planificateur dans la minimisation des retards d'expédition dans le processus PDP. Plus précisément, les objectifs sont les suivants :

- Présenter une revue de la littérature pour prouver que les modèles existants n'ont pas abordé le problème, et pour cette raison, il est nécessaire de développer une nouvelle approche de modélisation ;
- Introduire un modèle d'optimisation pour le PDP dans un contexte de fabrication avec plusieurs références de produits finis, à plusieurs lignes d'assemblage et avec une stratégie de production ATO ; et
- Comparer les résultats du modèle proposé avec des données de la planification réelle.

Ce chapitre est organisé comme suit : dans la section suivante, une revue de la littérature des modèles d'optimisation du PDP est présentée. Ensuite, une description plus détaillée de l'environnement de production est présentée dans la troisième section. Le modèle d'optimisation PDP est décrit dans la quatrième section. La cinquième section présente les résultats des calculs, la validation du modèle et une comparaison avec le processus de planification actuel. Finalement, des conclusions et des perspectives de recherches supplémentaires sont présentées.

## 5.2. Revue de la littérature

Sur la base du cadre d'analyse proposé par Díaz-Madroñero, Mula et Peidro (2014), nous avons analysé des références bibliographiques publiées après l'année 2000. Sur la base de ce même cadre, nous avons comparé le modèle que nous proposons aux solutions existantes. Nous avons mené une recherche bibliographique sur Scopus et nous avons sélectionné uniquement des articles révisés par les pairs et publiés dans des journaux.

Le tableau 12 présente les références qui font l'objet de cette revue et qui ont été analysées sur la base du cadre proposé par Díaz-Madroñero, Mula et Peidro (2014). Chaque référence a été associée à un identifiant qui sera utilisé pour une analyse plus approfondie dans les tableaux 13 et 14.

Les publications ont été étudiées sur la base des critères suivants :

- **Problème de planification** : quatre catégories ont été prises en compte dans l'analyse de la planification de la production, à savoir PDP, CBN, PA (Planification Agrégée) et Planification Hiérarchisée de la Production (PHP). Le PDP indique les quantités à produire par période pour chaque référence de produit fini. Son horizon de planification est soumis aux délais d'achat et de fabrication avec des révisions hebdomadaires ou mensuelles (Arnold, Chapman et Clive, 2008). Le CBN planifie la production et/ou l'achat des composants nécessaires à la production des articles finaux. L'extension de l'horizon de planification doit être au moins aussi longue que la somme des délais d'achat et de fabrication (Arnold, Chapman and Clive 2008). La PA est un processus permettant de spécifier les niveaux optimaux de production, de capacité, des inventaires, de sous-traitance et du retard (Chakraborty et al.2015). Ce processus regroupe les activités suivantes : l'ordonnancement de la production, la planification de besoins nets et les activités de contrôle de la production (Englberger, Herrmann et Manitz 2016) ;
- **Nombre de produits** : ce critère fait référence au nombre de références de produits finis qui a été pris en compte par les auteurs dans le cadre de leurs études. Deux catégories ont été proposées ici, un seul article (unique) ou plusieurs articles (à partir de deux références) ;

ID	Référence
1	(Akhoondi et Lotfi 2016)
2	(Bakar, Abbas et Kalaf, 2017)
3	(Chakraborty <i>et al.</i> 2015)
4	(Chern and Yang 2011)
5	(Englberger, Herrmann et Manitz, 2016)
6	(Feng, Rao et Raturi, 2011)
7	(Gahm, Dünnwald et Sahamie, 2014)
8	(Genin <i>et al.</i> , 2014)
9	(Gourgand, Lemoine et Norre, 2010)
10	(Guillaume, Thierry et Zieliński, 2017)
11	(Keung, Ip et Chan, 2001)
12	(Khaledi et Reisi-nafchi, 2013)
13	(Körpeoglu, Yaman et Aktürk, 2011)
14	(Martín, Díaz-Madroñero et Mula, 2020)
15	(Nedaei et Mahlooji, 2014)
16	(Sadiq, Abdulazeez et Haron, 2020)
17	(Sawik 2007)
18	(Soares et Vieira 2009)
19	(Tang et Grubbström 2002)
20	(Vanhoucke et Debels 2014)
21	(Vargas et Metters 2011)
22	(Vieira et Favaretto 2006)
23	(Vieira et Ribas 2004)
24	(Wang <i>et al.</i> 2017)
25	(Wu, Zhang et Zhu 2012)
26	(Yi, Min et Wu 2002)
27	(Zaidan <i>et al.</i> , 2019)
28	(Zheng-jia <i>et al.</i> 2010)
29	(Zobolas, Tarantilis et Ioannou 2008)

Tableau 12 : Références analysées et identification

- Période de planification : selon l'extension de l'horizon de planification, deux catégories ont été proposées, court moyen terme (à partir d'une semaine et jusqu'à six mois) et moyen long terme (à partir de six mois) ;
- Type de demande : deux types de demandes ont été proposés en fonction du niveau d'incertitude associé. La demande est classée comme déterministe lorsqu'elle est connue et stochastique lorsqu'elle est incertaine ;

- Extension de la demande : lorsque la charge et la capacité sont déséquilibrées, les auteurs proposent d'étudier le retard et/ou de calculer les ventes perdues ;
- Temps de réglage : la prise en compte de ce temps a été divisée en trois catégories : ceux qui prennent en compte les temps de réglage, ceux qui prennent en compte les temps de réglage reportés - dans lesquels le dernier produit par période a été fabriqué sans préparation supplémentaire au cours de la période suivante - et ceux qui ne prennent pas en compte les temps de réglage ;
- Rapport charge-capacité : pour étudier les conditions de déséquilibre entre la charge et la capacité, nous proposons deux catégories pour classer l'approche des auteurs : surcharge, qui considère les conditions dans lesquelles la capacité requise est supérieure à la capacité réelle et des retards sont générés, et sous-charge, qui considère les conditions dans lesquelles la capacité réelle est inférieure à la capacité requise et les ressources sont parfois inutilisées ;
- Ressources : en référence aux caractéristiques de l'environnement de production, les machines et les ressources peuvent être disposées dans l'atelier de travail comme des machines parallèles, des lignes de production ou des machines identiques ;
- Site de fabrication : en fonction du nombre de sites de production étudiés, deux catégories ont été définies ici : un seul site de production et plusieurs sites de production ;
- Approche de modélisation : la représentation proposée du système pourrait être la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE), Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entières (MILP) et multi-objectifs ;
- Approche d'optimisation : trois catégories ont été définies : méthodes exactes, heuristiques et métaheuristiques ;
- Outil de modélisation : afin d'étudier le logiciel utilisé pour résoudre le modèle, trois catégories ont été proposées. Nous proposons de commencer par classer le solveur (comme CPLEX, LINGO, Xpress-MP, Gurobi et GLPK). La deuxième catégorie se réfère au langage de programmation employé (C, C++, GMLP, Visual C, Java et Fortran ont été identifiés dans les références étudiées). La troisième catégorie se réfère au

langage de modélisation (Matlab, GALS, AMPL, OPL, AIMMS, Xpress-Model, WINQSB). Comme certaines études n'ont pas spécifié de détails de développement, une quatrième catégorie a été proposée pour rassembler ces publications (non spécifié) ;

- Validation : nous avons proposé de classer les expériences que les auteurs ont utilisées pour valider leurs modèles sur la base de trois critères : le type d'application, l'industrie et la stratégie du processus de production. Le type d'application pourrait être basé sur un système de production réel (cas réel) ou sur des expériences numériques (exemple numérique). Pour les validations sur le terrain, nous avons différencié le type d'industrie dans lequel les auteurs ont testé leurs modèles, par exemple : l'automobile, les semi-conducteurs, les appareils électroniques et les textiles. Enfin, nous avons proposé d'identifier la stratégie du processus de production. Trois catégories ont été principalement identifiées dans la littérature : fabrication sur commande, fabrication pour stockage, assemblage sur commande ; et
- Fonction objectif : les auteurs se sont intéressés à l'amélioration d'objectifs différents et parfois multiples. L'optimisation de l'utilisation de la capacité, l'optimisation du niveau et des coûts d'inventaires, l'optimisation du coût total de production, l'amélioration du niveau de service envers les clients et l'optimisation de la cadence de production, ont été au cœur des travaux de recherche.

Les tableaux 13 et 14 présentent l'analyse de chaque référence sur la base du cadre d'analyse proposé.

Une description plus précise de chaque référence est présentée dans les sous-sections suivantes.

### 5.2.1. Problème de planification, approche de modélisation approche d'optimisation et outil d'optimisation

Parmi les 25 références centrées sur le PDP, l'approche de modélisation la plus courante était multi-objectifs (68 %, 17 références sur 25). Les métaheuristiques étaient l'approche de solution privilégiée (44 %, 12 références sur 25). Les auteurs ont utilisé plusieurs logiciels de résolution (Gurobi, CPLEX, MS, GAMS, Navison). Quant au langage de programmation, Visual basic, C++ et C ont été fréquemment utilisés. Le langage de modélisation le plus répandu est Matlab.

Uniquement dans trois références (12 %, 3 références sur 25) les auteurs ont employé une approche de modélisation MILP pour le PDP. Ces auteurs ont utilisé des méthodes exactes pour résoudre le problème dans les logiciels de résolution suivants : MOSEK et CPLEX.

Les autres problèmes de planification de la production ont été très peu étudiés. Seules deux références ont considéré le CBN comme faisant partie du problème, mais ont également abordé une solution au niveau du PDP. Dans ces références, les auteurs ont modélisé le problème par la PLNE et l'ont résolu par des méthodes exactes. Deux références différentes ont étudié le PHP. Les auteurs ont modélisé le problème en PLNE et multi-objectifs, respectivement, et les ont résolus par des approches heuristiques. Deux références ont étudié la PA. Chakraborty et al. (2015) ont modélisé le problème par PLNE pour le résoudre ensuite par une approche d'optimisation par essais de particuliers. Zaidan et al. (2019) ont modélisé le problème par MILP et ont proposé une hybridation du recuit simulé et de la descente simplexe comme approche de la solution.

### 5.2.2. Type de demande, extensions de la demande, rapport charge-capacité

Les références étudiées privilégient la demande déterministe plutôt que stochastique (62 %, 18 références sur 29 en plus de 38 %, 11 références sur 29). Toutes ces références ont pris en compte le retard. Uniquement trois références ont proposé de modéliser les pertes de ventes. En ce qui concerne le rapport charge-capacité, toutes les références ont modélisé les conditions de surcharge et seulement deux ont considéré la condition de sous-charge.

Les ventes perdues ont été modélisées en plus grande proportion avec la demande stochastique (4 références sur 29). Pour ce type de demande, les conditions de surcharge ont été privilégiées dans la modélisation (11 références sur 29).

### 5.2.3. Fonction objectif et validation

L'optimisation du niveau et des coûts d'inventaires est au cœur de la quasi-totalité des références étudiées (86 %, 25 références sur 29). Ensuite, les auteurs ont proposé des modèles cherchant à améliorer le niveau de service envers les clients (76 %, 22 références sur 29). L'optimisation de l'utilisation de la capacité et l'optimisation du coût total de production ont présenté respectivement 12 et 10 modèles. Une seule référence a proposé un modèle axé sur la cadence de production. Tous les modèles cherchaient à optimiser au moins deux objectifs de

planification de la production. L'optimisation du niveau de service envers les clients et des niveaux et coûts d'inventaire a été étudiée dans 16 références. Ils sont suivis par les couples optimisation de l'utilisation de la capacité - du niveau de service envers les clients et optimisation du coût total de la production – niveaux et coûts d'inventaire, chacun avec 12 références et 11 références. Dans une troisième étape, les couples coût total de production-niveau de service envers le client et optimisation de la capacité – coût total de production ont été étudiés avec 8 et 7 références. Enfin, 4 références ont recherché à optimiser le niveau de service envers les clients, l'utilisation de la capacité, le coût total de production et les coûts/niveaux d'inventaire en même temps.

Sur 30 références, seules 8 références ont proposé une validation avec un cas réel. Parmi ces références, l'optimisation des coûts/niveau d'inventaire et du niveau de service envers les clients ont été les deux objectifs ayant fait l'objet du plus grand nombre de publications (5 références).

La plupart d'applications ont été testées avec des expériences numériques (69 %). Pour ce type d'application, l'optimisation des coûts/niveau d'inventaire et du niveau de service envers les clients ont été également, les objectifs les plus étudiés (11 références). Seules 2 références n'ont pas validé leurs modèles.

#### 5.2.4. PDP- dans des lignes de production, avec plusieurs références de produits finis et considération de temps de réglage

Parmi les 29 références considérées pour l'analyse documentaire proposée, seules deux références ont abordé le PDP dans une chaîne de production multiproduits en tenant compte les temps de réglage. Gourgand, Lemoine et Norre (2010) ont utilisé une approche de solution métaheuristique pour minimiser les coûts logistiques et optimiser l'utilisation des capacités. La minimisation des niveaux d'inventaires, des heures supplémentaires, des temps de préparation et des retards faisait partie de la fonction objectif définie par Vieira et Favaretto (2006). Les auteurs ont proposé une approche de solution heuristique et ont validé leur modèle PDP à l'aide d'expériences numériques en considérant trois lignes de production et quatre références de produits finis.

Dans les deux travaux précédents, des approches heuristiques et métaheuristiques ont été utilisées, dans le but de minimiser le temps de calcul. Les auteurs ont toutefois souligné que ces méthodes ne garantissaient pas de trouver une solution optimale, mais seulement une solution satisfaisante.

#### 5.2.5. PDP- avec machines égales, plusieurs références de produit fini et considération des temps de réglage

Cherchant également à proposer un PDP pour plusieurs références de produit fini, mais dans un environnement de production de machines identiques et en tenant compte les temps de réglage, Vieira et Ribas (2004) ont proposé d'utiliser un algorithme de recuit simulé pour minimiser les niveaux d'inventaires, d'inventaires de sécurité et des retards. D'expériences numériques de différentes tailles, dont les dimensions sont définies par le nombre de produits finis, les ressources et l'horizon de planification ont été menés. Le test avec les plus grandes valeurs de paramètres consistait en 10 produits finis, 4 ressources et 11 périodes dans l'horizon de planification. Dans le même contexte, mais en tenant compte de la minimisation des retards.

#### 5.2.6. PDP- plusieurs références produit fini, sans considérer les processus de productions

Dans les travaux menés par Nedaei et Mahlooji (2014) les auteurs ont proposé un modèle multi-objectifs pour le PDP dans des chaînes d'approvisionnement multiproduit et de fabrication sur commande, en tenant compte des délais de mise en place. La fonction objectif cherchait à minimiser les coûts de production et de inventaires. Le processus étudié concernait les modifications de la planification dans les départements de vente et de production. La modélisation MILP a été au cœur de cette approche.

#### 5.2.7. PDP- dans de lignes de production, plusieurs références de produit fini sans considérer les temps de réglage

Neuf références ont proposé des solutions pour le PDP dans des lignes de production multiproduits, mais sans tenir compte des temps de réglage. Cherchant à minimiser les délais de production et à optimiser l'utilisation des ressources dans un contexte d'ATO pour l'aérospatial, Gahm, Dünwald et Sahamie (2014) ont proposé un algorithme hybride. Les auteurs ont utilisé une approche de modélisation MILP et ont testé la solution dans des cas où les horizons de planification étaient inférieurs à 30 jours.

Genin et al. (2014), ont proposé un modèle de programmation linéaire, prenant en compte les heures supplémentaires, le retard, les licenciements et les coûts d'embauche dans un contexte de production multisites. Le modèle a été validé avec une étude de cas réel de fabrication de tubes en acier.

Cherchant à minimiser le niveau global d'inventaires, la quantité d'inventaires de sécurité et la surcapacité, Soares et Vieira (2009) ont proposé une approche par algorithme génétique et Sadiq, Abdulazeez et Haron (2020) ont proposé un algorithme mémétique. Une hybridation de l'algorithme de recherche gravitationnelle et de l'algorithme des chauves-souris a été proposée par Bakar, Abbas et Kalaf (2017) pour la même fonction multi-objectifs. Dans les modèles précédents, les auteurs n'ont pas pris en compte les temps de réglage ni les priorités de production.

Les algorithmes génétiques ont été exploités dans les travaux de Keung, Ip et Chan (2001) et Zobolas, Tarantilis et Ioannou (2008). Dans les deux études, les auteurs avaient l'intention d'optimiser les délais de livraison et, en même temps, de minimiser les retards. Le premier travail a été testé avec des applications numériques tandis que le second a été validé dans un environnement de production de fabrication sur commande. Afin de faire face aux conditions de surcharge, les auteurs évaluaient la possibilité de faire des heures supplémentaires, de retarder la livraison et si possible de produire certaines commandes plus tôt.

Wu, Zhang et Zhu (2012), ont également utilisé une approche métaheuristiques. Leur objectif était de maximiser l'utilisation des ressources et de minimiser les coûts de pénalisation des retards. Leur solution a été testée à l'aide d'expériences numériques. Zheng-jia et al. (2010), ont présenté un algorithme de colonie de fourmis pour proposer un PDP. La maximisation de l'utilisation de la capacité et la minimisation du rapport inventaire/retard étaient les objectifs qui ont motivé l'étude de ces auteurs.

Martín, Díaz-Madroñero et Mula (2020), ont utilisé trois heuristiques modifiées pour proposer un PDP pour une ligne de production avec une seule ressource (machine). Leur objectif était de minimiser le coût d'inventaires et le coût total de production. Ils ont validé les heuristiques modifiées avec des données d'un constructeur automobile.

### 5.2.8. PDP-machines parallèles, plusieurs références de produit fini sans considérer temps de réglage

Deux références ont envisagé des solutions PDP pour un environnement de production de machines parallèles, produisant plusieurs références de produits finis sans prendre en compte les temps de réglage. Akhoondi et Lotfi (2016) ont proposé un modèle mathématique non linéaire et ont utilisé une approche de résolution heuristique pour minimiser les coûts de production, du retard et d'inventaire. Leur modèle est proposé pour des contextes de production de demande stochastique. Sawik (2007) a recherché les mêmes objectifs et a inclus la minimisation du retard pour un environnement de production de fabrication sur commande avec une demande déterministe et des machines identiques. Une contrainte de disponibilité de matériaux a été prise en compte dans son modèle.

Pour des machines identiques, mais non pas parallèles, Wu, Liu et Wu (2002) ont proposé un algorithme génétique pour la génération du PDP. Ils visaient à minimiser les coûts d'inventaire et à optimiser l'utilisation des capacités.

### 5.2.9. PDP- une seule référence de produit fini sans considérer le temps de réglage

Cinq références ont proposé des PDP pour un seul produit sans tenir compte des temps de réglage. Dans ce contexte, des approches de solutions exactes ont été utilisées dans les cinq études suivantes : Chern et Yang (2011), Feng, Rao et Raturi (2011), Körpeoglu, Yaman et Aktürk (2011), Guillaume, Thierry et Zieliński (2017) et Tang et Grubbström (2002). Parmi ces cinq études, les quatre dernières visaient à maximiser le bénéfice et avaient une fonction objectif similaire. Les auteurs cherchaient à minimiser le coût total d'inventaires, de la production et du retard. Les mêmes objectifs ont servi de base aux travaux de Vargas et Metters (2011). Ce dernier est la seule référence qui propose un PDP pour un seul produit, en tenant compte des temps de réglage.

Quatre références présentent des solutions pour plusieurs niveaux de planification. Khaledi et Reisi-Nafchi (2013) ont proposé un modèle général qui peut être appliqué pour le PDP, le CBN et la planification globale de capacités (RCCP). Leur objectif était de minimiser les coûts d'inventaire, qui incluent les manquants et les excédents. Chakraborty et al. (2015) ont utilisé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour la planification à court et moyen

terme. La fonction objectif visait à minimiser la somme des coûts de production, des heures supplémentaires, d'inventaires, des retards, de l'embauche et des licenciements. Deux références ont proposé des solutions heuristiques pour la PHP, qui consistent en un ordonnancement de la production principale, une planification des besoins en matériel et le plan d'ordonnancement. Englberger, Herrmann et Manitz (2016) visaient à minimiser l'inventaire et l'utilisation de la capacité supplémentaire tandis que Vanhoucke and Debels (2014) cherchaient à minimiser les coûts d'affectation, de retard, d'avancement et de déviation de la production.

#### 5.2.10. Le modèle proposé face aux modèles existants

Une comparaison entre les modèles analysés et le modèle que nous présenterons dans la section suivante (MP, modèle proposé) nous a permis d'identifier qu'aucun modèle n'avait été proposé pour un PDP dans un environnement industriel à plusieurs lignes d'assemblage dans un même site de production, fabricant plusieurs références de produits finis, avec une demande déterministe et une stratégie de production d'assemblage sur commande. En plus de cela, le modèle proposé tient compte du retard et du temps de réglage et a été validé avec des tests construits à partir de données réelles. Enfin, la fonction objectif cherche à minimiser le retard d'expédition des commandes clients pour améliorer le niveau de service.

Parmi les modèles analysés, aucun ne proposait une approche de solution exacte. Des modèles similaires ont été présentés, mais les auteurs ont utilisé des approches de résolution heuristiques ou métaheuristiques afin de minimiser le temps de calcul total.

Quatre modèles parmi les références analysées sont très proches du modèle proposé. Ces modèles ont été présentés par Zobolas, Tarantilis et Ioannou (2008) ; Wu, Zhang et Zhu (2012) ; Gahm, Dünnwald et Sahamie (2014) ; Genin et al. (2014). Cependant, aucun des quatre modèles n'a pris en compte les temps de réglage. Contrairement au modèle proposé, Gahm, Dünnwald et Sahamie (2014) ont utilisé l'heuristique et la métaheuristique comme approches de solution, mais leur fonction objectif a été construite pour améliorer les coûts totaux de production. Même si Genin et al. (2014) ont utilisé une approche de solution exacte, la fonction objectif a été construite pour réduire les coûts d'inventaires.

Les deux derniers modèles sont les plus proches de notre modèle. Néanmoins, Wu, Zhang et Zhu (2012) n'ont pas seulement pris en compte le retard, mais aussi les pertes de ventes. En revanche, les auteurs ont proposé une fonction multi-objectifs qui cherchait à améliorer à la fois les coûts des stocks, l'optimisation des capacités et les niveaux de service à la clientèle. Le modèle n'a été validé qu'au moyen d'expériences numériques et les auteurs n'ont pas précisé la stratégie du processus de production sur laquelle ils se sont basés pour générer les données. Le modèle proposé par Zobolas, Tarantilis et Ioannou (2008) est celui qui se rapproche le plus de notre modèle. Les ressemblances par rapport à notre modèle concernent l'analyse de plusieurs postes de charges (goulets) et le nombre élevé d'unités demandées. Cependant, leur modèle ne considère pas un processus de fabrication artisanale, les ressources sont des machines. En conséquence, la modélisation de la capacité est différente. De plus, les temps de réglage ne sont pas considérés comme paramètres du modèle. Finalement, la longueur de l'horizon de planification de leur modèle est courte par rapport à notre cas d'étude (12 semaines) et uniquement deux références de produits finis étaient considérées.

Notre modèle est unique à de multiples égards. Tout d'abord, compte tenu de l'environnement de planification de la production, c'est le seul modèle qui prend en compte le problème du PDP dans un système de production à la commande de plusieurs références de produits finis (articles directeurs) dans plusieurs lignes d'assemblage. Les lignes d'assemblage fonctionnent selon une stratégie de production par lots et ne sont pas reconfigurables. De multiples goulets ont été analysés (9 postes de charge critiques). La capacité des postes de charge a été modélisée en prenant en considération des opérateurs hétérogènes ayant des performances différentes pour l'exécution des tâches. Les paramètres permettent de modéliser des variations capacitaires en nombre de collaborateurs et facteurs d'efficacité. Ensuite, compte tenu du processus de production et de la variété d'articles, il a fallu envisager plusieurs macro-gammes de fabrication. Finalement, la fonction objectif concerne la minimisation des retards dans l'expédition des commandes clients.



Contexte Industriel		Fonction Objectif	Validation		Outil de modélisation			ID Article
Stratégie de production	Secteur industriel		Exemple numérique	Cas réel	Langage d'optimisation	Langage de programmation	Logiciel de résolution	
O	MT	Electronique-filtres miniature		X		GMLP	Gurobi-GLPK	MP
O	MT	Electronique		X		GMPL	Gurobi-GLPK	1
-	-	Usinage et acier	X		Matlab R2009a	GAMS 23.5		2
-	-	-	X		Matlab			3
S	MT	Textile		X	Code Clocks v 10.05	C		4
		-		X				5
S	MT	Electronique haute tension	X				X	6
-	-	-	X				X	7
O	AT	Aérospatial		X		Visual Basic	Gurobi	8
-	-	Sidérurgique		X		ILOG-LP	CPLEX	9
-	-	-	X				CPLEX, Lingo	10
-	-	-	X			Julia	JUMP	11
-	-	Usinage métaux	X		Matlab			12
-	-	-		X			X	13
-	-	Automobile	X				CPLEX	14
O	MT	Automobile		X		GMPL	Gurobi	15
O	MT	-	X		AnyLogic	Java	MOSEK	16
-	-	-	X		Matlab			17
O	MT	Entrepôt	X			AMPL	CPLEX	18
-	-	-	X		Object Oriented	C++		19
-	-	-	X				X	20
O	MT	Sidérurgique	X			C++		21
S	MT	-	X				X	22
-	-	-	X				X	23
-	-	-	X				X	24
O	AT	Mécanique		X			X	25
-	-	-	X				X	26
-	-	Textile		X		C	MS	27
-	-	Fabrication savon	X				X	28
-	-	-	X				GAMS	29

Tableau 14 : Comparaison du modèle proposé avec les modèles existants – Partie 2<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Acronymes Fonction Objectif : CO, de l'anglais « *Capacity Optimization* », optimisation de l'utilisation de la capacité. ILC, de l'anglais « *Inventory Level and Costs* », l'optimisation du niveau et des coûts d'inventaires. TPC, de l'anglais « *Total Production Cost* », l'optimisation du coût total de production. CSL, . Acronymes Stratégie de production : MTO, de l'anglais « *Make-To-Order* », fabrication sur commande. MTS, de l'anglais « *Make-To-Stock* », fabrication pour stockage. ATO, de l'anglais « *Assemble-To-Order* », assemblage sur commande.

### 5.3. Description du problème et méthodologie

Nous proposons un nouveau modèle mathématique qui cherche à minimiser le retard total dans l'horizon de planification du PDP.

Le modèle est proposé pour un site de production qui travaille sur la base d'une stratégie de production d'assemblage sur commande, dans deux lignes d'assemblage. La production est effectuée par lots. Plusieurs références de produits finis sont fabriquées dans ces lignes. Les produits ont été classés en trois macro-familles à partir des macro-nomenclatures et macro-gammes de production. Dans cette étude nous allons nommer les macro-familles A, B, C.

Comme le suggère la théorie PDP, seuls les postes de charge qui se comportent comme des goulets ont été pris en compte. En effet, neuf postes de travail avaient été précédemment identifiés comme des goulets dans les deux lignes d'assemblage. Dans la figure 29, nous avons représenté la distribution des goulets dans les deux lignes. Nous avons également indiqué les macro-familles qui sont traitées à l'intérieur des goulets.

Sur les neuf goulets, deux sont communs aux familles de produits A et C, deux sont spécifiques à la famille de produits B et cinq sont communs à A, B et C. Sur ces postes de travail, le processus est principalement artisanal, 90 % des opérations sont effectuées par des opérateurs. Les opérateurs à l'intérieur des goulets ont différentes capacités pour effectuer les tâches. La capacité doit en conséquence être calculée pour des travailleurs hétérogènes. Un facteur d'efficacité a été défini pour chaque membre du personnel de production et a été inclus dans le modèle en tant que paramètre représenté par  $E_{kt}$ . Ce paramètre est associé aux postes de charge et est défini par période d'analyse ( $t$ ). Nous avons donc considéré la possibilité de modéliser la variation des facteurs d'efficacité par période d'analyse (semaine).

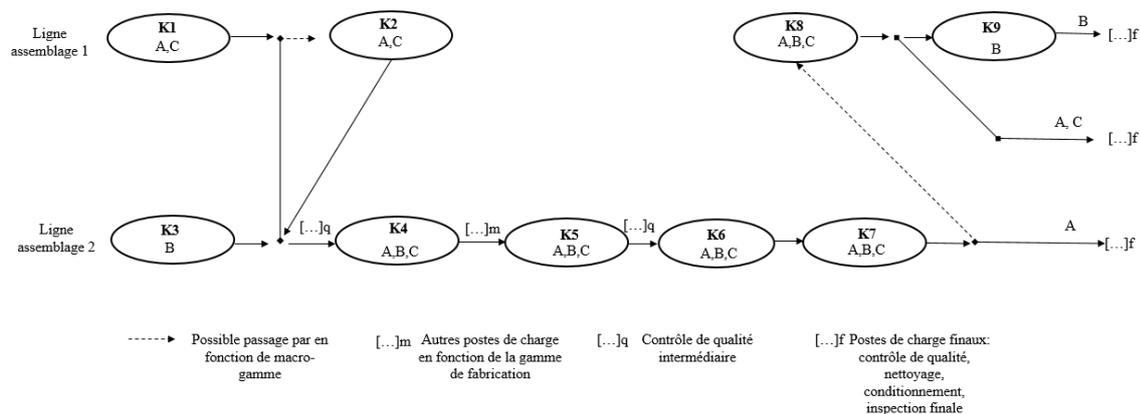


Figure 29 : Représentation du processus de production

Nous avons défini 15 macro-gammes de fabrication en fonction des goulets associés à la gamme, des temps de fabrication et de temps de réglage. Ces macro-gammes ont été définies à l'aide du responsable méthodes du secteur de production analysé. Dix macro-gammes ont été définies pour la macro-famille A (1-10), 4 macro-gammes ont été identifiées pour la macro-famille B et une seule macro-gamme a été définie pour la macro-famille C. Nous présentons dans le Tableau 15 la répartition des macro-gammes par macro-famille et nous y détaillons les goulets associés à chaque macro-gamme, ainsi que le temps moyen de fabrication et de réglage.

Macro-famille	Macro-gammes	Goulets associés	Temps Fabrication moyen goulets (minutes)	Temps Réglage moyen (minutes)
A	1	K1,K4,K5,K6,K7	4.66	4.34
	2	K1,K4,K5,K6,K7	4.14	9.43
	3	K1,K4,K5,K6,K7,K8	6.87	16.41
	4	K1,K4,K5,K6,K7,K8	9.53	14.82
	5	K1,K4,K5,K6,K7	6.27	8.028
	6	K2,K4,K5,K6,K7,K8	5.85	11.75
	7	K1,K4,K5,K6,K7,K8	3.78	14.96
	8	K1,K4,K5,K6,K7,K8	4.97	14.36
	9	K1,K4,K5,K6,K7,K8	2.86	15.3
	10	K1,K4,K5,K6,K7,K8	5.34	14.25
B	11	K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9	3.84	15
	12	K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9	4.37	14
	13	K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9	4.05	15
	14	K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9	1.31	12
C	15	K1,K2,K4,K5,K6,K7,K8,K9	8.61	11.45

Tableau 15 : Macro-gammes par macro-famille

La demande a été considérée comme déterministe, car le carnet de commandes est plein dans un horizon de 9 mois. Chaque commande client contient un seul type de produit fini et l'unité d'analyse du PDP est la référence de produit fini. Dans le cas où la commande client est acceptée pour plusieurs références de produits finis, elle est divisée en plusieurs commandes pour l'analyse (une commande et une référence de produit fini).

La théorie du PDP suggère que l'horizon de planification doit être égal ou supérieur au plus long délai cumulé. Ce délai est la somme du plus long délai d'approvisionnement et de production. Une analyse des délais d'approvisionnement et de production par macro-famille est présentée dans le tableau 16.

Macro-famille	Plus long délai cumulé (semaines)
A	22
B	34
C	26

Tableau 16 : Plus long délai cumulé par macro-famille de produits

Selon les données présentées dans le tableau 16, nous devrions considérer un horizon de planification supérieur à 34 semaines dans nos tests pour considérer le plus long délai cumulé.

Dans l'horizon PDP nous allons considérer quatre types de commandes. Les commandes en cours de fabrication avec ou sans retard d'expédition au moment de planifier. Les commandes qui n'ont pas encore démarrée production, avec ou sans retard au moment de planifier.

### 5.3.1. Hypothèses

- Disponibilité de matières premières et composants : notre modèle repose sur l'hypothèse que toutes les matières premières et tous les composants nécessaires sont disponibles au moment du lancement de la production ;
- Annulations et avancement des commandes clients : le modèle permet de modéliser le changement de la date d'expédition demandée par le client. Cependant, nous n'avons pas considéré les coûts associés à l'annulation des commandes clients ;
- Variations de la capacité : nous avons considéré la modélisation de la variation du nombre d'opérateurs disponible par goulet par période d'analyse (semaine). Nous avons également modélisé les variations des facteurs d'efficacité d'opérateurs par période

d'analyse. Par conséquent, l'absentéisme, le licenciement et l'embauche peuvent être modélisés ;

- Coûts des pénalités d'inventaire des produits finis : nous n'avons pas associé un coût à l'inventaire des produits finis ;
- Priorité dans le traitement de commandes clients : le traitement des commandes clients n'est pas sélectif. Toutes les commandes clients doivent être traitées sans priorités ; et
- Articles directeurs, unité d'analyse : La stratégie du processus de production a un impact sur le PDP. Dans un environnement ATO, le plan est généralement réalisé sur la base d'unités d'articles finaux ou d'un ensemble d'articles dans les commandes des clients. Nous allons donc considérer les références des produits finis comme articles directeurs.

La méthodologie qui a été suivie lors de la conception et validation du modèle est présentée ici. Tout d'abord, l'équipe de recherche a déterminé les goulets dans les deux lignes d'assemblages étudiés. Pour ce faire, une analyse du rapport charge-capacité a été réalisée pendant trois mois pour un horizon de planification d'un an, en incluant tous les postes de travail des deux lignes. Cette analyse nous a permis d'identifier les postes de travail qui présentaient régulièrement une condition de surcharge. Une condition de surcharge a été définie même en considérant les heures supplémentaires légales des travailleurs, qui étaient de 10 % du temps de travail légal par semaine. La charge totale par semaine ne pouvait pas être traitée dans le poste de travail, ce qui générait des retards. Nous avons identifié à l'aide du responsable BE, les macro-familles dans lesquelles nous pourrions classer les produits. Une étude de macro-nomenclatures de production nous a permis d'identifier les familles A, B et C. Ensuite, l'équipe de recherche a recueilli des données sur les temps de traitement et de mise en place pour toutes les opérations effectuées à l'intérieur des goulets d'étranglement. Ces données ont été recueillies à partir du système ERP pendant six mois de production. L'analyse de ces données avec le responsable méthodes nous a permis de définir les différentes macro-gammes des macro-familles.

Des informations sur les commandes des clients ont également été recueillies à partir du système ERP pendant une durée de neuf mois. Nous avons considéré les quatre types de commandes que nous avons citées précédemment, soit : commande en cours de fabrication avec et sans retard dans la date d'expédition et commandes pas démarrées avec et sans retard dans la date d'expédition. L'entreprise avait précédemment défini comme objectif principal la minimisation des retards d'expédition. Nous avons développé une approche d'optimisation

exacte basée sur un modèle mathématique. Le modèle permet de proposer un PDP qui minimise le retard total d'expédition pour un horizon de planification d'environ neuf mois. Afin de valider le modèle, des données relatives à la demande pour les neuf mois précédant à la date de validation du modèle ont été récupérées et organisées sous forme de tests. Les résultats du modèle ont été comparés aux valeurs réelles des retards d'expédition pour plusieurs cas.

## 5.4. Modèle Mathématique

Afin d'augmenter les niveaux de service envers les clients, un modèle mathématique ayant pour objectif de minimiser les retards dans l'expédition des commandes clients est présenté dans cette section. Une méthode de programmation linéaire en nombres entiers (MILP) a été utilisée pour modéliser le problème. Le modèle a été programmé à l'aide du langage de programmation GMLP (GNU Mathematical Programming Language) et a été résolu à l'aide du solveur GUROBI. Ce modèle est une extension d'un modèle que nous avons présenté dans des travaux de recherche précédents (Tobón Valencia, *et al.*, 2019c).

Les goulets ont été classés selon deux analyses. Premièrement, les postes de charge sont classées par type, les stations de travail manuelles ( $K_m$ ) et automatisées ( $K_a$ ) ont été séparées pour modéliser le système. Deuxièmement, elles sont classées en fonction du délai de production des lots. En ce qui concerne cette classification, trois types de postes de travail sont considérés comme suit : les postes de travail avec un délai de production de lot qui n'est pas supérieur à 1 semaine ( $k^1$ ), ceux avec un délai de production de lot de 2 semaines ( $k^2$ ) et enfin, ceux qui nécessitent 3 semaines pour traiter un lot ( $k^3$ ). Le tableau 17 présente la classification des goulets par type et par délai de production.

Goulet	Type	Goulet	Type
K1	$K_m^1$	K5	$K_m^3$
K2	$K_m^3$	K6	$K_a^1$
K3	$K_m^1$	K7	$K_a^1$
K4	$K_m^2$	K8	$K_m^2$
		K9	$K_m^1$

Tableau 17 : Classification des goulets par type et délai de fabrication

Nous présentons par la suite les indices, paramètres et variables du modèle. La fonction objectif et les contraintes sont décrites.

#### 5.4.1. Indices

$i, p$  : produit fini

$j$  : commande client

$t$  : période d'analyse

$k, h$  : goulet

$r$  : opérateur

#### 5.4.2. Paramètres

$m$  : nombre total de références de produits finis demandées,

$n$  : nombre total de commandes clients à planifier,

$l$  : nombre total de goulets ou de postes de charges analysées,

$d$  : longueur de l'horizon de planification PDP. Cette longueur est définie par le nombre de semaines ouvrables (une semaine ouvrable comprend 5 jours de travail),

$H$  : nombre de minutes de travail disponibles par semaine de travail pour les opérateurs et les machines. En ce qui concerne les opérateurs, cette valeur a été estimée sur la base du temps de travail légal par jour en tenant compte des périodes de pause, soit 6,5 heures par jour. Pour les machines, il a été considéré qu'elles étaient disponibles 24 heures sur 24,

$D_j$  : date d'expédition demandée par le client pour la commande  $j$ ,

$Q_{ij}$  : quantité de la référence du produit fini  $i$  demandée dans la commande  $j$ ,

$P_{ik}$  : temps de fabrication de la référence du produit fini  $i$  dans le goulet  $k$ ,

$A_{ik}$  : temps de réglage de la référence du produit fini  $i$  dans le goulet  $k$ ,

$BP_{ik}$  : paramètre binaire qui indique la macro-gamme du produit  $i$ . Ce paramètre n'est égal à 1 que si le processus de production du produit  $i$  implique d'opérations du goulet  $k$ ,

$BP_{max_i}$  : ce paramètre indique le dernier goulet de la macro-gamme du produit  $i$ ,

$BP_{min_i}$  : ce paramètre indique le premier goulet  $k$  de la macro-gamme du produit  $i$ ,

$BS_k$  : ce paramètre indique la taille maximale du lot pouvant être traité simultanément sur les postes de travail automatisés  $k_A$ ,

$E_{kt}$  : efficacité moyenne d'opérateurs dans le goulet  $k$  au cours de la semaine  $t$ . Ce paramètre permet au chef planificateur de modéliser la variation de l'efficacité du groupe d'opérateurs le long de l'horizon de planification. Ce paramètre peut prendre une valeur comprise entre 0 et 1,

$M_{kt}$  : nombre d'opérateurs disponibles au goulet  $k$  dans la semaine  $t$ . Ce paramètre permet au chef planificateur de modéliser la variation de la capacité dans les postes de travail manuel,  
BM : un très grand nombre.

### 5.4.3. Variables

$u_{ijkt}$  : la quantité de produits  $i$  à fabriquer de la totalité  $Q_{ijt}$  demandée par le client dans la commande  $j$  au goulet  $k$  en semaine  $t$ .

$x_{ijkt}$  : Calculé à partir de la valeur de la variable  $U_{ijkt}$  au dernier goulet de la macro-gamme du produit  $i$ ,  $x_{ijkt} = U_{ij(k=BP_{max})t}$ . Cette variable indique la semaine de fin de fabrication de la commande  $j$ .

$b_{ijkt}$  : variable binaire liée à  $U_{ijkt}$ . Cette variable est égale à 1, pour le goulet  $k$  si la quantité de produit  $i$  de la commande  $j$  qui est fabriquée au cours de la semaine  $t$  est supérieure à zéro.

$y_{ijkt}$  : variables binaires liée à  $x_{ijkt}$ . These are variables equal to 1, si  $x_{ijkt} > 0$ . Cette variable est égale à 1, si  $x_{ijkt} = 0$ , donc  $y_{ijkt} = 0$ . Cette variable indique si le produit  $i$ , de commande  $j$  a été ou pas fabriqué en semaine  $t$ .

$w_{ijkt}$  : variable binaire liée à  $B_{ijkt}$ . Cette variable est égale à 1, uniquement pour la première semaine ( $t$ ) de production du produit  $i$  de la commande  $j$ .

$T_j$  : retard dans l'expédition de la commande  $j$ . Calculée en nombre de semaines de travail,

$v_{kt}$  : capacité du goulet  $k$  en semaine  $t$ , présenté en indiquant le nombre de minutes,

$s_{ijkt}$  : indique le début du créneau de fabrication du produit  $i$ , commande  $j$  dans le poste de charge  $k$  en semaine  $t$ .

$f_{ijkt}$  : indique la fin du créneau de fabrication du produit  $i$ , commande  $j$  dans le poste de charge  $k$  en semaine  $t$ .

$fm_{ijkt}$  : pour les goulets avec un délai de fabrication de 3 semaines ( $k^3$ ), cette variable indique la troisième semaine au cours de laquelle la production de la quantité manquante du produit  $i$  de la commande client  $j$  commence à être traité.

$sm_{ijkt}$  : pour les goulets avec un délai de fabrication de 2 semaines ( $k^2$ ), cette variable indique la deuxième semaine au cours de laquelle la production de la quantité manquante du produit  $i$  de la commande client  $j$  commence à être traitée.

$c_j$  : moment de fin de fabrication de la commande  $j$ , indiquant la dernière semaine de production,

$Z$  : retard total de toutes les commandes des clients à planifier dans la période de planification étudiée.

#### 5.4.4. Fonction Objectif

$$\text{Minimiser } Z = \sum_{j \in J} T_j$$

Cette fonction vise à minimiser la somme des retards d'expédition pour l'ensemble des commandes de clients à traiter dans l'horizon de planification.

#### 5.4.5. Contraintes

Six types de contraintes ont été définis pour le problème d'optimisation : de demande, de capacité, de production, de production par lots, d'agrégation en quantités PDP et du calcul de retard pour chaque commande client. Les contraintes de demande assurent la production de la quantité totale demandée de chaque commande client pour la date d'expédition demandée par le client, ou pour une date avec un retard minimal à l'intérieur de l'horizon de planification. Ces contraintes permettent aux goulets de traiter le lot dans des délais de production différents, selon une classification spécifique. Les contraintes de capacité permettent de calculer la capacité disponible pour chaque goulet selon qu'il est manuel ou automatisé. Les contraintes de production cherchent à équilibrer la charge et la capacité des goulets et veillent à ce que le processus de production de chaque produit fini respecte la macro-gamme. Les contraintes de production par lot permettent de suivre le processus de production en fonction du délai de production qui a été fixé pour le goulet. Enfin, les contraintes d'agrégation en quantités PDP regroupent la production hebdomadaire de chaque commande client sur chaque goulet afin de garantir que la quantité demandée a été traitée dans l'horizon de planification.

##### 5.4.5.1. Contraintes de demande

$$\sum_{t \in T} x_{ijt} = Q_{ij} \quad \forall i, j \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} u_{ijkt} = BP_{ik} * Q_{ij} \quad \forall i, j, k \quad (2)$$

$$U_{ijkt} = b_{ijkt} * Q_{ij} \quad \forall i, j, k \in k^1 \quad (3)$$

$$U_{ijkt} \leq b_{ijkt} * Q_{ij} \quad \forall i, j, k \in k^2, k^3 \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} b_{ijkt} \leq 2 * BP_{ik} \quad \forall i, j, k \in k^2 \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} b_{ijkt} \leq 4 * BP_{ik} \quad \forall i, j, k \in k^3 \quad (6)$$

La première contrainte garantit que la quantité totale produite du produit fini (i) pendant la période de planification (T) soit égale à la quantité demandée pour chaque commande (j). En fonction de la macro-gamme du produit (i), la contrainte (3) garantit que la quantité totale produite dans les goulets soit égale à la quantité totale demandée (taille du lot) par commande (j).

La contrainte (2), signifie que la somme d'U prend une valeur positive supérieure à zéro uniquement si la macro-gamme ( $BP_{ik}$ ) oblige le produit à passer par le goulet k.

Pour les goulets qui présentent un délai de production par lot d'une semaine ( $k^1$ ) la quantité fabriquée ( $U_{ijkt}$ ) en une semaine doit être égale à la quantité totale demandée pour chaque commande ( $Q_{ij}$ ). Pour les autres semaines de l'horizon de planification, cette quantité est égale à zéro.

Si le goulet présente un délai de production par lot de deux ( $k^2$ ) ou trois semaines ( $k^3$ ), la quantité produite pendant une semaine ( $U_{ijkt}$ ) est inférieure à la quantité totale demandée ( $Q_{ij}$ ) telle qu'exprimée dans la contrainte (4).

La contrainte (5) est liée aux goulets qui présentent un délai de production de deux semaines ( $k^2$ ). Cette contrainte exige que le nombre de semaines pour le traitement d'un lot à l'intérieur du goulet ( $k^2$ ) ne soit pas supérieur à deux semaines si le goulet fait partie de la macro-gamme de production d'i ( $BP_{ik} = 1$ ).

Enfin, la contrainte (6) a été établie pour les postes de travail qui ont un délai de production de trois semaines ( $k^3$ ). Cette contrainte contrôle que le nombre de semaines pour le traitement d'un lot à l'intérieur du goulet ( $k^3$ ) ne soit pas supérieur à trois semaines si le goulet est requis par la macro-gamme de production d'i ( $BP_{ik} = 1$ ).

#### 5.4.5.2. Contraintes de capacité

$$v_{kt} = E_{kt} * M_{kt} * H \quad \forall k \in k_m \quad (7)$$

$$v_{kt} = BS_k * H \quad \forall k \in k_a \quad (8)$$

Pour les postes de travail manuels ( $k_m$ ), la capacité est calculée en prenant en considération le temps de travail disponible par semaine d'opérateurs qui participent au processus de production

du goulet en semaine t (le temps disponible par travailleur a été défini comme étant de 1800 minutes/semaine). Le temps disponible est ensuite affecté par un facteur d'efficacité qui a été défini pour chaque poste de travail et par semaine t.

Pour les postes de travail automatisés ( $k_a$ ), la capacité est calculée en considérant le nombre de produits qui peuvent être traités en même temps et le temps de travail disponible par semaine.

#### 5.4.5.3. Contraintes de production

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} (P_{ik} * u_{ijkt}) + (A_{ik} * b_{ijkt}) \leq v_{kt} \quad \forall k, t \quad (9)$$

$$BP_{ik} * BP_{ih} * Q_{ij} * \sum_{t \in T} t * f_{ijkt} \leq BP_{ik} * BP_{ih} * Q_{ij} * \sum_{t \in T} t * s_{ijht} \quad \forall i, j, t, k \in K, h \geq k_t \quad (10)$$

La neuvième contrainte limite la charge à l'intérieur du goulet à un niveau inférieur ou égale à la capacité disponible du goulet. La charge du côté gauche de l'équation a été calculée en considérant le temps de production ( $P_{ik}$ ) multiplié par le nombre d'unités à traiter ( $U_{ijkt}$ ) et en ajoutant à cette valeur le temps de réglage ( $A_{ik}$ ).

En considérant les goulets consécutifs ( $k$  est ici défini comme le poste de travail précédent de  $h$ ), cette contrainte garantit que le début de la production au goulet  $h$  (à droite de l'équation) soit supérieur ou égal au temps de fin dans le goulet  $k$ . Cette contrainte n'est valable que pour les goulets requis dans la macro-gamme.

#### 5.4.5.4. Contraintes de production par lot

$$s_{ijkt} \leq b_{ijkt} \quad \forall i, j, t, k \in k^1, k^2, k^3 \quad (11)$$

$$f_{ijkt} \leq b_{ijkt} \quad \forall i, j, t, k \in k^1, k^2, k^3 \quad (12)$$

$$\sum_{t \in T} t * f_{ijkt} \geq \sum_{t \in T} t * s_{ijkt} \quad \forall i, j, k, t \quad (13)$$

$$s_{ijkt} + f_{ijkt} = b_{ijkt} \quad \forall i, j, k \in k^1, k^2, t \quad (14)$$

$$Fm_{ijkt} \leq b_{ijkt} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (15)$$

$$Sm_{ijkt} \leq b_{ijkt} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (16)$$

$$\sum_{t \in T} t * Fm_{ijkt} \geq \sum_{t \in T} t * s_{ijkt} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (17)$$

$$\sum_{t \in T} t^* S_{m_{ijkt}} \geq \sum_{t \in T} t^* F_{m_{ijkt}} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (18)$$

$$\sum_{t \in T} t^* f_{ijkt} \geq \sum_{t \in T} t^* S_{m_{ijkt}} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (19)$$

$$s_{ijkt} + F_{m_{ijkt}} + S_{m_{ijkt}} + f_{ijkt} = b_{ijkt} \quad \forall i, j, k \in k^3, t \quad (20)$$

Si le poste de travail présente un délai de production par lot d'une ( $k^1$ ), de deux ( $k^2$ ) ou de trois semaines ( $k^3$ ), les contraintes (11) et (12) permettent que le temps de début et de fin du traitement d'un lot de produit  $i$  de la commande  $j$  dans le goulet  $k$  se produisent pendant des semaines différentes.

La contrainte (13) indique la relation entre les moments de début et de fin de production pour chaque goulet  $k$  ( $k^1, k^2, k^3$ ). Cette contrainte garantit que le moment de fin soit postérieur au moment de début.

Pour les goulets qui ont un délai de production d'une ( $k^1$ ) ou de deux semaines ( $k^2$ ), la contrainte (14) garantit que nous produisons ( $B_{ijkt}=1$ ), en début ou en fin de semaine, mais pas dans les deux.

Pour les goulets qui présentent un délai de production par lot de trois semaines ( $k^3$ ), les contraintes (15-19) donnent l'enchaînement des moments de début, de milieu de fin, de milieu de début et de fin de la production du produit  $i$  de la commande client  $j$ . Ces contraintes garantissent la séquence suivante : la première semaine de production est la semaine de début  $S_{ijkt} = 1$  la deuxième semaine de production ( $F_{m_{ijkt}} = 1$ ) se situe après la semaine de début. De même, la troisième semaine de production ( $S_{m_{ijkt}} = 1$ ) se situe après  $F_{m_{ijkt}}$ . Le processus de production dans ces postes de travail  $k^3$  se termine en semaine  $F_{ijkt}$ .

La contrainte (17) présente la relation entre  $S_{ijkt}$  and  $F_{m_{ijkt}}$ . De même, la contrainte (18) propose le lien entre  $F_{m_{ijkt}}$  and  $S_{m_{ijkt}}$ , et la contrainte (19) propose le lien entre  $S_{m_{ijkt}}$  and  $F_{ijkt}$ .

La dernière contrainte de ce groupe (20) assure pour les postes de travail de type  $k^3$  que si nous produisons une partie du lot de produit  $i$ , de demande  $j$  ( $B_{ijkt}=1$ ), une seule des variables suivantes soit égale à un  $S_{ijkt}, F_{m_{ijkt}}, S_{m_{ijkt}}, F_{ijkt}$ , alors le reste doit être zéro. Cela signifie que  $B_{ijkt}=1$  que nous sommes dans la première, deuxième ou troisième semaine de la production.

#### 5.4.5.5. Contraintes d'agrégation en quantités PDP

$$x_{ijt} = u_{ijkt} \quad \forall i,j,t,k = \text{BPmax}_i \quad (21)$$

$$y_{ijt} = b_{ijkt} \quad \forall i,j,t,k = \text{BPmax}_i \quad (22)$$

$$w_{ijt} = b_{ijkt} \quad \forall i,j,t,k = \text{BPmin}_i \quad (23)$$

La contrainte (21) présente la relation entre  $x_{ijkt}$  et  $U_{ijkt}$ . Cette contrainte introduit une nouvelle variable de décision ( $x_{ijkt}$ ) qui indique la quantité totale de produit  $i$ , de commande  $j$  qui est traitée dans le goulet final ( $\text{BPmax}_i$ ). La contrainte (22) présente la relation entre  $y_{ijt}$  and  $B_{ijkt}$ . La 23e contrainte est très similaire à la précédente, une nouvelle variable ( $y_{ijt}$ ) qui est le binaire de  $x_{ijkt}$ , n'est égale à un que lorsque la quantité totale de produits  $i$ , de commande  $j$  a été traitée dans le dernier goulet ( $k$  maxi) dans la semaine  $t$ . Les variables suivantes  $x_{ijkt}$  et  $y_{ijt}$  sont les variables principales du PDP.  $U_{ijkt}$  est une variable supplémentaire qui permet de suivre le processus de production parmi de multiples goulets d'étranglement.

La 23e contrainte présente une autre nouvelle variable binaire  $w_{ijt}$ , qui définit si le processus de production du produit  $i$  de la commande  $j$  a commencé ou non au cours de la semaine  $t$ .

#### 5.4.5.6. Contrainte du retard sur les commandes

$$t * y_{ijt} \leq D_j + T_j \quad \forall i,j,t \quad (24)$$

Cette contrainte permet de calculer la valeur du retard pour chaque commande. La partie gauche de l'inéquation indique la fin de la fabrication de chaque commande. Le retard de chaque commande est la différence entre le moment de fin de fabrication et la date d'expédition demandée par le client  $D_j$ .

Ce nouveau modèle d'optimisation pour les problèmes de minimisation du retard au niveau du PDP a été validé par un ensemble d'expériences de tailles différentes. Les résultats de cette analyse sont présentés dans la section suivante.

## 5.5. Résultats

Le modèle présenté dans la section précédente vise à améliorer le niveau de service envers les clients en minimisant les retards dans l'expédition des commandes dans un horizon de

planification à moyen terme. Le tableau 18 présente la valeur des paramètres pour les 31 tests. Planning horizon (d).

Test	Nombre de commandes (n)	Quantité totale demandée (Q)	Horizon de planification (d)
1	10	2835	6
2	11	2847	6
3	12	2892	6
4	13	3142	6
5	14	3242	7
6	15	3250	7
7	16	3466	7
8	17	3966	7
9	18	4216	8
10	19	4566	8
11	20	4866	8
12	21	4916	8
13	22	4921	8
14	23	4957	8
15	24	5082	9
16	25	5179	9
17	26	5664	9
18	27	5984	10
19	28	6084	10
20	29	6106	10
21	30	6556	10
22	31	6856	11
23	32	6866	11
24	33	7166	12
25	34	7466	13
26	35	7516	13
27	36	7657	13
28	37	7863	14
29	38	8213	14
30	39	8263	16
Le plus grand test	40	8343	17

Tableau 18 Valeur de paramètres par test

Les résultats sont présentés en termes de valeurs de la fonction objectif et sa comparaison avec les dates d'expédition réelles, le temps de calcul et enfin, d'objectifs supplémentaires du PDP (rapport charge-capacité et niveaux de stock). La validation du modèle a été effectuée sur la base de 31 tests. Un groupe de paramètres était stable pour le groupe de tests, à savoir les goulets (l) et le nombre total d'opérateurs (s). Les valeurs de ces paramètres étaient respectivement de 9 et 14. L'autre groupe de paramètres a changé d'un test à l'autre, les paramètres variables étant

le nombre de commandes des clients ( $n$ ), la quantité totale demandée ( $Q$ , en unités) et l'horizon de planification ( $d$ , en semaines ouvrables).

### 5.5.1. Résultats Expérimentaux

Une évolution des valeurs de la fonction objectif du modèle a été représentée en fonction du nombre de commandes dans la figure 30. Il est possible de constater que la valeur de la fonction objectif augmente légèrement pour les tests ayant un nombre de commandes supérieure à dix et inférieure à trente. Ensuite, pour les tests avec un nombre de commandes entre trente-et-quarante, la valeur du retard cumulé augmente fortement. Il est important de remarquer que pour les tests avec plus de trente commandes, il y avait plus des commandes avec un retard existant au moment de lancer la planification. Cette valeur du retard existant a un impact sur la valeur de la fonction objectif.

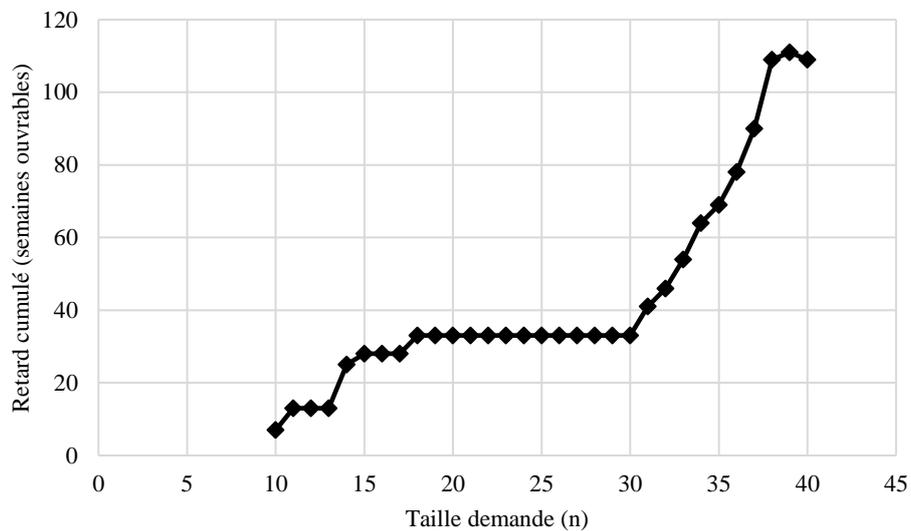


Figure 30 : Variation de la fonction objectif par rapport au nombre total de commandes

Pour le 31<sup>e</sup> test, la valeur de la fonction objectif, retard cumulé, était de 109 semaines avec un pourcentage d'écart par rapport à la valeur optimale de 15,2 %. Cette valeur a été obtenue après 17 000 secondes. Ce temps de calcul est très élevé et permet de constater que cette approche de résolution est optimale pour des tests avec 35 commandes et 7500 unités demandées, dans un horizon de planification de 13 semaines ouvrables.

Nous avons comparé la valeur du retard cumulé proposé par le modèle avec la valeur du retard réel pour les 31 tests (Tableau 20).

Les résultats du tableau 19 permettent de tester la performance du modèle en termes de réalisation de l'objectif principal, qui est une minimisation du retard dans la date d'expédition. Pour 31 cas, les propositions du modèle ont permis de réduire le retard total. Afin de calculer la réduction des retards, une comparaison a été effectuée entre la date d'expédition proposée par le modèle et la date à laquelle la commande client a été réellement expédiée.

Test	Réduction du retard (semaines ouvrables)	Réduction du retard (commandes produit finis)
1	23	5
2-4	21	5
5	9	5
6 et 7	6	6
8	7	6
9	2	6
10	3	7
11-16	4	7
17-20	5	9
21	6	9
22	7	8
23 et 24	8	8
25	5	8
26	29	7
27	36	6
28	31	6
29	18	6
30	25	6
31	28	7

Tableau 19 : Réduction du retard en nombre de semaines ouvrables et nombre de commandes

La différence entre la date d'expédition proposée par le modèle et la date réelle d'expédition de la commande constitue une réduction du retard pour une seule commande. Ensuite, l'addition de la réduction de retard pour toutes les commandes étudiées dans un test est la valeur qui est indiquée dans la deuxième colonne du tableau 19. Afin de compléter ces résultats, le nombre total de commandes pour lesquelles le retard a été réduit est présenté dans la dernière colonne du tableau 19.

Nous proposons de faire une analyse plus détaillée sur le trente et unième test, qui comptait quarante commandes clients (n) et 8343 unités à fabriquer. Une comparaison entre le modèle et les dates d'expédition demandées a été effectuée. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 20.

Commande	Macro-Gamme	Quantité commandée	Date expédition		
			demandée	modèle	réelle
1	11	300	-6	1	1
2	13	250	2	2	2
3	3	350	6	4	6
4	5	75	2	2	3
5	2	67	2	2	3
6	11	350	3	3	4
7	13	250	4	4	4
8	5	442	4	3	4
9	11	350	7	7	8
10	12	401	17	9	20
11	2	12	-5	1	1
12	10	45	2	2	2
13	13	250	6	6	6
14	1	100	-11	1	1
15	15	8	-2	1	1
16	13	216	6	6	7
17	13	500	9	16	9
18	13	250	-3	3	1
19	11	350	11	12	12
20	11	300	12	13	12
21	3	50	2	2	2
22	4	5	4	4	4
23	10	36	6	6	6
24	7	125	6	6	7
25	10	97	9	9	10
26	3	485	15	15	15
27	1	320	17	17	18
28	3	100	17	17	22
29	15	22	17	17	24
30	3	450	17	17	25
31	13	300	-5	5	4
32	2	10	-4	1	2
33	11	300	-4	7	4
34	13	300	-3	9	4
35	11	50	-3	1	26
36	13	141	-3	4	13
37	11	206	-3	2	4
38	13	350	-2	10	4
39	5	50	1	1	10
40	4	80	2	2	3

Tableau 20 : Comparaison dates d'expédition demandée, proposée par le modèle et réelle-test

Pour vingt-quatre commandes, le modèle propose de compléter les commandes plus tôt ou exactement à la date demandée. Selon le modèle, cinq commandes auraient pu être complétées avant la date demandée. Toutefois, il serait important de considérer que ces quarante commandes n'étaient probablement pas les seules à traiter au cours d'un horizon de planification de 17 semaines ouvrables. En fait, quarante commandes ne représentent qu'environ 30 % du nombre total de commandes clients qui devaient être traitées dans un horizon de planification de cette longueur.

### 5.5.2. Résultats et temps de calcul

Prenons en considération le temps de calcul, qui a été calculé comme suit :  
*Temps de calcul total = temps de résolution + temps de calcul + temps de transfert*

Le temps de transfert dans l'équation précédente est la conversion du fichier GLPK en un fichier LP. Les résultats du temps de calcul pour chaque test sont présentés dans le tableau 21.

Test	Temps de calcul total (s)	Test	Temps de calcul total (s)
1	0.13	18	1.33
2	0.11	19	1.85
3	0.14	20	1.68
4	0.13	21	2.8
5	0.15	22	15.12
6	0.23	23	16.82
7	0.25	24	42.41
8	0.35	25	130.9
9	0.42	26	163.02
10	0.66	27	>2000s
11	1.04	28	>2000s
12	0.9	29	>4000s
13	0.48	30	>2000s
14	1.14	31	>15000s
15	1.1		
16	0.82		
17	1.4		

Tableau 21 : Temps total de calcul par test

Il est possible de constater que la valeur du temps de calcul augmente avec la taille du test. Nous avons donc analysé les résultats du temps de calcul en fonction des paramètres suivants :

- Quantité totale demandée (Q) : figure 31 ;
- Nombre de commandes à planifier (n) : figure 32 ; et
- Horizon de planification (d): figure 33. Cette courbe a été construite en calculant la moyenne du temps de calcul total pour les tests ayant la même valeur de d.

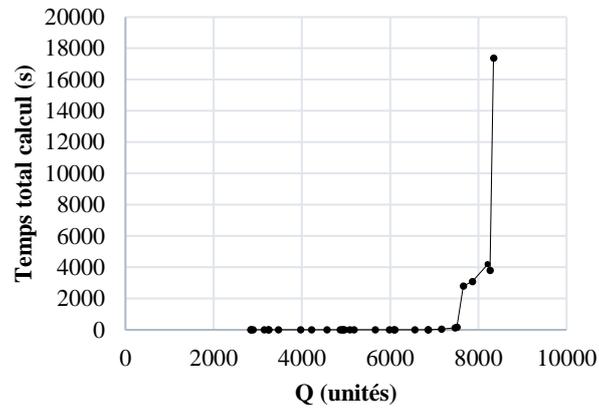


Figure 31 : Temps de calcul en fonction de la quantité totale commandée

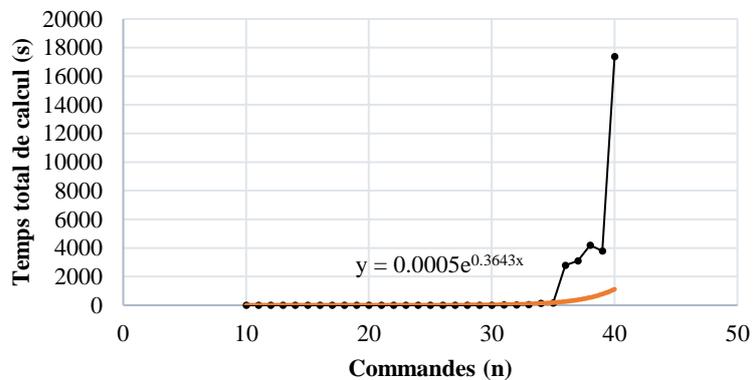


Figure 32 : Temps de calcul en fonction du nombre total de commandes

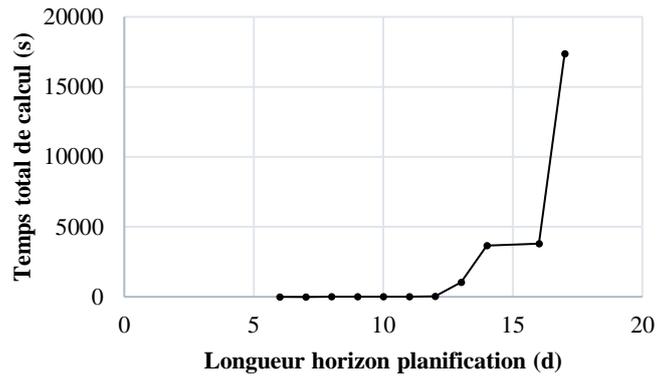


Figure 33 : Temps de calcul en fonction de la longueur de l'horizon de planification

Les deux premières figures montrent que le problème d'optimisation étudié est NP- difficile à résoudre. Il est également possible de percevoir, à travers ces courbes, que les résultats de l'approche de la solution proposée (méthode exacte) sont efficaces pour les petits et moyens tests. Ces tests avaient un nombre total de commandes de clients qui n'était pas supérieur à quarante et 8343 unités en quantité demandée.

Pour des tests avec une valeur supérieure de paramètres  $n$  (nombre de commandes),  $Q$  (quantité totale demandée) et  $d$  (horizon de planification), l'approche de résolution exacte ne serait pas efficace. Après 15 000 secondes, comme nous avons mentionné précédemment, il n'a pas été possible de trouver une solution exacte et les limites inférieure et supérieure du retard total ( $Z$ ) étaient distantes de 15%.

Nous proposons maintenant de passer à la dernière section de l'analyse des résultats. Étant donné que les résultats du modèle vont être utilisés dans le PDP, d'autres variables telles que le rapport charge-capacité et les niveaux d'inventaire nécessitent une analyse.

### 5.5.3. Autres résultats PDP

Du point de vue des stocks, deux types d'inventaires peuvent apparaître à partir des hypothèses du modèle : l'inventaire des produits finis et l'inventaire d'en-cours. L'inventaire de produits finis peut apparaître lorsque les commandes sont complétées avant la date d'expédition demandée par le client. Nous avons étudié la variation de ce type d'inventaire pour le trente et unième test. Les valeurs d'inventaire des produits finis en unités ont été calculées à partir des

dates d'expédition proposée par le modèle versus la date d'expédition demandé par le client. Nous présentons la valeur de ces inventaires dans le tableau 22.

	Horizon de planification (semaines ouvrables)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Stock Produit fini (unités)	0	0	442	0	350	0	0	0	0	401	1293	973	572	472	472	472	450

Tableau 22 : Inventaire produit fini (unités) test 31

Dans cet exemple (tableau 22), le stock de produits finis peut être porté entre une et cinq semaines selon l'écart entre la date d'expédition proposée par le modèle et la date d'expédition demandée par le client. Il serait important de considérer une nouvelle contrainte pour limiter les niveaux d'inventaires dans une prochaine version du modèle. En ce qui concerne l'inventaire d'en-cours, le tableau 23 présente un détail du niveau d'en-cours pour chaque goulet sur la base du trente et unième test. Les cellules grises représentent un niveau zéro d'en-cours.

	Horizon de planification (semaines ouvrables)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
K1																	
K2																	
K3																	
K4		742	442	442	342	22											
K5		1552	2467	2235	3035	2735	2855	3424	2527	2177	1877	1877	1855	870	870	870	
K6					36												
K7																	
K8		250	250	250													
K9		751	401	751	751	751	401	401									

Tableau 23 : Inventaire en-cours test 31

Dans cet exemple (tableau 23), le poste de charges 5 est celui qui présente le niveau le plus élevé d'en-cours tout au long de l'horizon de planification. Ces résultats impliquent que ce poste de travail est le goulet le plus important parmi les neuf postes de charge étudiés. Nous avons donc procédé à une analyse du rapport charge/capacité pour le 31e test.

Le pourcentage de la capacité employée pour chaque goulet et par semaine ouvrable est présenté dans le tableau 24. Afin de faciliter la lecture, les valeurs zéro de la capacité employée ont été remplacées par des cellules colorées en grises. Le pourcentage de la capacité employée dans chaque poste de travail par semaine de travail est en fait un indicateur qui pourrait aider le chef planificateur à analyser quand il est envisageable de traiter plus d'unités dans un goulet tout en respectant les contraintes de capacité et en évitant les conditions de surcharge.

	Horizon de planification (semaines ouvrables)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
K1	77%		25%														
K2	13%																
K3	74%	10%															
K4	89%	82%	48%	24%	11%	21%	5%										
K5	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	57%	100%	100%	84%	100%	100%	88%
K6	1%	0.7%	6%	0.4%	0.1%	0.1%	0.02%		0.14%	0.02%		0.02%	0.02%		0.48%	0.05%	1%
K7	20%	12%	6%	5%	0.9%	4%	0.8%		3%	0.86%		0.85%	0.84%		6%	2%	13%
K8	88%	44%	100%	22%	53%	41%	28%		40%	33%		33%	28%		44%	45%	58%
K9	6.6%	8%	10%	6%	5%	8%	10%		13.2%	5%		6%	5%			8%	0.7%

Tableau 24 : Capacité utilisée test 31

L'analyse présentée dans le tableau 24 nous permet de constater que le poste de charges 5 (K5) a une utilisation de la capacité de 100 % tout le long de l'horizon de planification. Il constitue en effet, le goulet principal parmi les postes de charge étudiés. À l'aide de ce modèle, des actions pour faire face aux conditions de surcharge, telles que l'augmentation capacitaire et le repositionnement des collaborateurs polyvalents, pourraient être analysées par le chef planificateur. Le modèle lui permettrait également d'évaluer l'impact des variations capacitaires, induites par l'absentéisme, l'évolution de l'efficacité d'opérateurs et les pannes des machines (postes K6 et K7).

Les données présentées dans le tableau 24, montrent aussi quant aux postes de charge K1-K4 et K6-K9, qu'ils ont toujours de capacité disponible. Toutefois, l'utilisation de la capacité dans ces postes de charge n'est pas tout à fait optimale. Par exemple, dans le poste de charges K1 le modèle a arrêté la production pendant la semaine 2 pour continuer à produire en semaine 3, alors qu'il avait toujours de capacité disponible pour traiter des commandes en semaine 1. Ceci peut être expliqué par le fait d'avoir arrêté le modèle au but de 15 000 secondes avec écart maximum de 15 % par rapport à la solution optimale.

Le modèle a été validé en prenant en considération quatre aspects principaux : la comparaison des résultats de la fonction objectif avec les retards réels cumulés, le temps de calcul, les niveaux d'inventaire et la relation charge-capacité dans les goulets. Compte tenu des valeurs de la fonction objectif, le plan proposé par le modèle pour les petits et moyens tests permet de réduire les retards cumulés. L'approche d'optimisation donne des résultats performants pour proposer un planning pour 40 commandes. En ce qui concerne le temps de calcul, l'approche exacte a donné de bons résultats dans les petits et moyens tests. Cependant, pour le test le plus grand, le temps de calcul a été d'environ quatre heures. En ce qui concerne l'inventaire de

produits finis, nous n'avons pas considéré des contraintes pour limiter les niveaux de ce type d'inventaire. Nous avons remarqué en conséquence que pour le plus grand test il y avait des stocks de produits finis pour des périodes importantes (5 semaines). L'inventaire d'en-cours n'a pas non plus été limité par le modèle proposé. Enfin, compte tenu de la relation entre la capacité et la charge, aucun des plans proposés par le modèle ne présentait des conditions de surcharge.

## 5.6. Conclusion

Le modèle présenté dans ce chapitre permet d'ajuster la planification des commandes au niveau du PDP dans un contexte industriel de production par lots, multi-produits, à plusieurs lignes assemblage avec une stratégie de production d'assemblage sur commande. Notre revue de la littérature a montré que ce problème n'avait pas été étudié auparavant dans le domaine de la planification de la production. Par conséquent, un nouveau modèle mathématique a été proposé pour minimiser le retard d'expédition des commandes au niveau du PDP. La considération des contraintes de production par lots et des différents délais de traitement d'un lot dans un goulet spécifique rend le modèle extrêmement compliqué.

En respectant la capacité disponible et les contraintes de production par lots, le modèle permet de trouver des propositions optimales pour minimiser les retards dans l'expédition des commandes, dans un temps de calcul raisonnable, pour des tests de taille moyenne. Ceci pour un maximum de 40 commandes, 8900 unités et un horizon de planification de 17 semaines ouvrables.

Une approche de solution exacte a été utilisée pour équilibrer le retard des commandes dans un horizon de planification de 17 semaines ouvrables. Le temps de calcul et le retard total ont été évalués avec 31 tests de taille différente. L'ensemble des résultats obtenus pour ces tests est plus performant que les propositions de planification actuelles en termes de retard total d'expédition.

Le modèle d'optimisation proposé tient compte de quatre dimensions supplémentaires : la quantité de produits finis à produire par semaine ouvrable et par commande client, le PDP pour traiter toutes les commandes dans l'horizon de planification, la capacité employée de chaque

goulet par semaine ouvrable tout le long de l'horizon de planification, et le respect des macro-gammes de production en fonction de la référence du produit fini.

Le modèle proposé comporte certaines limites. Tout d'abord, une seule fonction objectif a été prise en compte : la minimisation du retard total d'expédition des commandes. L'optimisation de cette variable permet d'augmenter le niveau de service du client, mais cela pose certains problèmes. La présence d'en-cours dans différents goulets et l'apparition d'inventaires des produits finis sont quelques-uns des problèmes qui ont été rencontrés. Il serait nécessaire d'envisager l'optimisation de variables supplémentaires telles que l'inventaire d'en-cours, l'inventaire des produits finis et l'utilisation de la capacité des ressources. Une autre option pourrait consister à envisager un coût de pénalité pour les inventaires (en-cours et produit fini) et à utiliser une fonction multi-objectifs pour optimiser la capacité tout en réduisant le retard total d'expédition.

Une autre limitation vient du nombre de commandes planifiées. Avec l'approche de la solution actuelle, seule une partie des commandes clients dans le plus long délai cumulé ont été prises en compte. Afin de considérer toutes les commandes confirmées dans un horizon de planification de 34 semaines ouvrables, il est fortement recommandé d'échanger l'approche de solution avec une méthode de résolution approximative (heuristique ou métaheuristique) afin d'obtenir des suggestions pour la planification des commandes dans un temps de calcul raisonnable.

# Chapitre 6 : Outil optimisation PDP- approche de résolution heuristique

## 6.1. Introduction

Dans le Chapitre 5, nous avons présenté un modèle d'optimisation pour la minimisation du retard cumulé dans l'horizon de planification du PDP. Sur la base d'une approche de résolution exacte, nous avons proposé une solution à la problématique du retard dans le cadre de la planification à moyen terme adaptée au contexte de notre partenaire industriel. Nous avons ainsi développé un modèle d'optimisation pour un contexte industriel d'assemblage sur commande, avec une fabrication par lot de plusieurs produits finis sur plusieurs lignes d'assemblage pour le PDP.

Comme nous l'avons évoqué, ce modèle a proposé une solution pour la minimisation du retard et, en même temps, il permettait d'obtenir une planification du pré-positionnement de la charge dans un horizon de 17 semaines. Ce modèle est performant pour les tests de petite et moyenne taille. Nous tenons à rappeler que la taille de tests était définie par les paramètres suivants : la longueur de l'horizon de planification (en nombre de semaines), le nombre de commandes à planifier, le nombre de produits finis à fabriquer et les goulets.

La valeur des paramètres que nous avons atteints avec la version du modèle exact, présenté dans le Chapitre 4, était en dessous de celle définie par le partenaire industriel. L'horizon de planification exigé par le partenaire était de 40 semaines (environ 9 mois). En conséquence, la valeur des paramètres suivants : nombre de commandes et quantité de produits finis à planifier, était supérieurs par rapport à la valeur que nous avons atteinte avec le plus grand test lancé avec l'approche exacte.

Le temps de calcul de l'approche exacte était très élevé (supérieur à 17 000 secondes) pour le plus grand des tests que nous avons lancés : 40 commandes, 8500 unités de produits finis, horizon de planification de 17 semaines et 9 goulets. En effet, dans les travaux Bakar, Abbas et Kalaf (2017) et Sadiq, Abdulazeez et Haron (2020), les auteurs indiquent que lorsque le nombre

de produits, le nombre de postes de charge et la longueur de l'horizon de planification augmentent, le PDP devient un problème complexe. A cela s'ajoute la considération du temps de réglage qui peut encore compliquer plus le problème. Étant donné la complexité du problème, les approches de résolution heuristiques et métaheuristiques sont recommandées pour proposer des solutions valables dans un temps de calcul raisonnable. Nous avons en conséquence, décidé de changer d'approche de résolution pour une approche heuristique.

Nous présentons dans ce chapitre un algorithme heuristique pour la minimisation du retard dans l'expédition des commandes clients dans l'horizon PDP de notre partenaire industriel. Notre objectif avec cet algorithme est de proposer un PDP dans l'horizon défini par notre partenaire industriel dans un temps de calcul raisonnable. Si bien que l'approche heuristique ne nous permettra de trouver un PDP optimal, il permettra de proposer un PDP valable. Le PDP proposé, respectera les contraintes capacitaires et permettra au chef planificateur de modéliser l'impact des variations capacitaires sur le PDP tout le long de l'horizon de planification. Dans le chapitre 4, nous avons détaillée les activités dans le processus PDP pour lesquelles il est envisageable d'exploiter l'algorithme que nous proposons.

Ce chapitre commence avec une section de revue de la littérature de modèles d'optimisation PDP avec des approches de résolution heuristiques et métaheuristiques. Ensuite, nous présentons notre algorithme heuristique. Les valeurs des paramètres des différents tests et les résultats obtenus avec l'algorithme sont présentés après. Finalement, nous abordons les conclusions et les perspectives d'amélioration de l'algorithme proposé.

## 6.2. Revue de la littérature

L'optimisation du PDP a fait l'objet de multiples recherches. Nous avons conduit une revue de la littérature sur les modèles d'optimisation PDP qui ont utilisé des approches de résolution heuristique ou métaheuristique.

L'analyse de l'état de l'art a été réalisée dans deux moteurs de recherche en ligne : Science Direct et Scopus. Nous avons considéré uniquement les publications de revues et les articles de conférence. Les chaînes de recherche suivantes ont été exploitées dans les deux moteurs de recherche :

- TITLE-ABS-KEY(“Master Production Schedule” OR “Master Production Scheduling”) AND TITLE-ABS-KEY(“Metaheuristic” OR “Genetic Algorithm” OR “GA” OR “ Ant Colony” OR “Bee Colony” OR “Particle Swarm Optimization” OR “PSO” OR “Simulated Annealing” OR “SA” OR “Taboo Search”); et
- TITLE-ABS-KEY (“Master Production Schedule” OR “Master Production Scheduling”) AND TITLE-ABS-KEY (“Heuristic” OR “Hybrid Heuristic”).

L’exploitation des deux dernières chaînes de recherche et la limitation aux publications dans des journaux ou des conférences nous ont permis de retrouver 55 références (32 références avec la première chaîne de recherche et 33 références avec la seconde) avec 8 références en doublons. Seules les références proposant des modèles d’optimisation pour le PDP ont été sélectionnées. Pour donner suite à l’analyse des articles, nous avons retenu 15 références sur 32 de la première chaîne de recherche et 9 références sur 33 de la seconde chaîne de recherche. Enfin, nous avons retenu et analysé 24 références.

Les modèles d’optimisations étudiées se sont intéressés à des fonctions objectifs multiples. La minimisation des coûts, la maximisation des revenus, la réduction de la variabilité de la charge, la réduction des niveaux d’inventaires et l’amélioration du niveau de service client sont les principaux objectifs des références étudiées.

En considérant une approche de résolution heuristique et la minimisation des coûts comme fonction objectif, Akhoondi et Lotfi (2016) ont proposé un PDP optimal lors d’évènements inattendus (la variabilité des temps de production) apparaissent dans le scénario de production. Dans cette recherche, le coût est défini comme la somme des coûts de production, des commandes en attente et d’inventaires. Le modèle mathématique non linéaire s’adresse à des environnements de production multi produits, à demande stochastique, qui ont également des temps de production variables. L’algorithme heuristique est basé sur la recherche locale et la théorie des contraintes.

L’heuristique COLOMAPS (COMplexity and LOad driven Master Production Scheduling) que Golmohammadi et Mansouri (2015) ont proposée était également basée sur la théorie des contraintes. Le caractère innovant de leur algorithme résidait dans le fait que les calculs étaient réalisés pour toutes les postes de charge de la ligne de production et pas seulement pour les goulets. Ensuite, pour chaque poste de charge, l’algorithme évaluait la possibilité qu’elle

devienne un goulet. Une fois le goulet identifié, un premier PDP était proposé. L'objectif de l'algorithme était de maximiser la rentabilité nette de l'entreprise, la cadence de production devait alors être maximisée. Si la cadence pouvait être améliorée en variant les quantités produites, le PDP initial était modifié.

Dans les travaux de Körpeolu, Yaman et Selim Aktürk (2011), l'objectif était également de maximiser le revenu. Ils ont utilisé une approche de programmation stochastique à plusieurs étapes pour générer le PDP dans des environnements de production à capacité limitée, avec des temps de traitement contrôlables et une demande stochastique. Les auteurs ont ainsi proposé une alternative qui différait des hypothèses courantes des systèmes ERP lors du calcul du PDP. Ces hypothèses sont une capacité infinie, des temps de traitement fixes et une demande déterministe.

Van Den Broecke, Van Landeghem et Aghezzaf (2005) ont présenté une stratégie du PDP cyclique qui minimisait les coûts totaux de mise en place et de maintien d'inventaires. Ils ont exploité d'abord un algorithme heuristique qui déterminait la longueur du cycle et les séquences de production d'un processus de production multi produits à plusieurs étapes. Ensuite, un modèle MILP permettait de sélectionner la séquence de production qui minimisait la fluctuation de la charge tout en tenant compte des contraintes de capacité.

Afin d'évaluer l'impact du niveau de service ciblé sur le coût de production optimal, Feng, Rao et Raturi, (2011) ont testé quatre heuristiques différentes (une approche de valeur approximative, deux approches de stock de sécurité et une approche gamma). Ils ont proposé un PDP optimal pour des environnements de production de demande stochastique de produits uniques.

Dörmer et Gujjula (2013) ont utilisé des heuristiques pour minimiser la variabilité de la charge et la surcharge de plusieurs postes de travail dans l'horizon de planification du PDP. Ils ont modifié les heuristiques suivantes pour définir les dates de traitement d'ordres de production dans l'horizon de planification : IWB (équilibre indirect de la charge de travail), DWB (équilibre direct de la charge de travail) et MMW (minimisation de la charge de travail maximale).

La réduction du temps de réglage était la fonction objectif des recherches menées par Hill et al. (2000) ; Hill, Berry et Schilling (2003). Dans la première publication, les auteurs ont employé une heuristique de recherche locale pour générer un PDP à deux niveaux (pour les produits intermédiaires et finaux) dans une entreprise dédiée à la fabrication de produits chimiques. Dans la seconde référence, les auteurs ont comparé la performance de cette heuristique avec d'autres approches en fonction des composants manquants, les niveaux d'inventaire et le temps de réglage total.

Martín, Díaz-Madroñero et Mula (2020) ont proposé un algorithme heuristique pour générer un PDP optimal en termes de coûts de production, coûts d'inventaires et coûts du retard. Les auteurs ont testé l'algorithme dans un scénario de production d'un seul poste de travail, 84 références de produits finis et un horizon de planification de 6 périodes (semaines).

En ce qui concerne les métaheuristiques comme approche de résolution, neuf des références étudiées cherchent à proposer un PDP optimal qui minimise les coûts. Le modèle de programmation linéaire mixte à nombre entier (MILP) proposé dans les travaux de Chen et Lin (2008) avait comme objectif de planifier les approvisionnements et le PDP pour une seule installation. Ils ont utilisé l'optimisation par essaims de particules pour minimiser la somme des coûts de production, de matières premières manquantes et de transport. Au niveau du PDP, l'algorithme minimisait la somme des coûts d'inventaire, de mise en place et de production. L'algorithme a été testé pour proposer un PDP de deux types de produits finis dans un horizon de planification de 6 mois.

Sadiq, Abdulazeez et Haron (2020) ont proposé un algorithme mémétique, une hybridation de l'algorithme génétique et la recherche locale pour un problème PDP multi-objectif. L'algorithme proposait le PDP en considérant une utilisation optimale de la capacité disponible, tout en minimisant le niveau d'inventaire et sans influencer le niveau de service envers les clients. Les auteurs ont testé l'algorithme dans différents scénarios de production avec un nombre maximal de 20 produits, 4 postes de charge et 13 périodes de planification. Lorsqu'ils ont augmenté le nombre de périodes à 20, le nombre de produits a été réduit à 4.

Bakar, Abbas et Kalaf (2017) ont présenté un algorithme de recherche gravitationnelle hybridé avec un algorithme chauve-souris pour proposer un PDP. La fonction multi-objectif cherchait à minimiser le niveau d'inventaires, les coûts d'inventaires et maximiser le niveau de service.

La validation de l'algorithme a été effectuée dans un scénario de production avec trois postes de charge, quinze produits et un horizon de planification de treize périodes.

Un algorithme génétique a été utilisé dans les travaux de Li et He (2013) pour maximiser le bénéfice en unités de temps. Les auteurs ont indiqué que l'exploitation de cet algorithme s'adressait aux entreprises produisant de multiples références de produits finis en petits lots. Yuan, Wang et Dong (2010) ont également employé un algorithme génétique pour optimiser le PDP, mais ils ont abordé la solution pour les entreprises du secteur du carbone. Leur algorithme visait à minimiser les coûts de production et d'inventaire en trouvant des niveaux de production et d'inventaires optimaux dans l'horizon du PDP.

Dans les travaux de Zaidan *et al.* (2019), un algorithme hybride de recuit simulé et la descente du simplex, a été proposé pour résoudre les problèmes à objectifs multiples de la planification de la production agrégée (PA) dans des environnements flous. L'algorithme de recuit simulé a permis de trouver des optimums globaux des fonctions objectifs suivantes : minimisation des coûts de production et minimisation des coûts de main-d'œuvre. L'horizon de planification de la PA était de 6 mois.

Wu, Liu et Wu (2002) ont proposé l'algorithme CCGA (de l'anglais : Constraint Consistent Genetic Algorithm) qui génère un PDP en minimisant les coûts totaux d'inventaire tout en respectant la date de livraison. Le modèle a été proposé pour des environnements de production ayant des machines identiques. Les temps de début et de fin de chaque produit sont représentés dans les chromosomes.

Wong, Chan et Ip (2001) ont cherché à minimiser les coûts des livraisons précoces et tardives. Cette fonction objectif peut également être définie comme la minimisation du temps maximum de traitement des commandes. Ils ont utilisé un algorithme génétique pour proposer l'ordonnancement à la journée tout en définissant un PDP valable dans d'ateliers de flux hybrides.

Un algorithme de colonie de fourmis a été introduit dans les travaux de Wu *et al.* (2010) pour maximiser l'utilisation d'équipements et minimiser le rapport entre les coûts d'inventaire et les coûts de retard. Dans le modèle, les auteurs ont considéré une priorité de traitement égale pour chaque produit et les conditions de surcharge n'étaient pas autorisées. Wu, Zhang et Zhu (2012)

ont également exploité un algorithme de colonie de fourmis pour générer le PDP, mais leur objectif était de maximiser l'utilisation de la capacité et de minimiser les pénalités du retard.

Afin de minimiser les coûts du retard et de l'avance, Zobolas, Tarantilis et Ioannou (2008) ont proposé un algorithme génétique pour générer le PDP. Leur solution s'adressait aux environnements de production qui ont un modèle de production par lot, avec plusieurs ressources de production et avec une stratégie de production de fabrication sur commande. Les résultats de l'algorithme génétique étaient plus performants que le PDP proposé par l'ERP de leur partenaire industriel.

Soares et Vieira (2009) ont proposé un algorithme génétique pour générer un PDP prenant en compte la minimisation du niveau d'inventaire global, de la quantité des stocks de sécurité et de la surcapacité requise. Le modèle calculait pour chaque produit, ressource et période, les besoins nets, les quantités totales à réaliser, les niveaux d'inventaire initial et final, le niveau de service et la surcapacité requise. Les auteurs n'ont pas présenté d'application réelle.

Sajja *et al.* (2018) introduisaient l'approche de résolution de Jaya pour trouver un PDP optimal avec la même fonction objectif proposée par Soares and Vieira (2009). Cet algorithme est une métaheuristique qui repose sur des paramètres de contrôle simples. Les auteurs ont comparé la solution proposée par Jaya avec celle obtenue avec la méthode TLBO (de l'anglais Teaching Learning Based Optimization Method). Ils ont réussi à démontrer que l'approche Jaya avait un meilleur taux de convergence. L'algorithme a été testé dans un système de production de fabrication sur stock, produisant plusieurs références de produit fini (12 références), avec plusieurs postes de charge (3) et un horizon de planification de 24 périodes (semaines).

Vieira et Ribas (2004) ont utilisé l'algorithme du recuit simulé pour proposer un PDP optimal en minimisant le niveau de stock, le stock de sécurité et le retard. Ils ont validé le modèle par des expériences numériques dans lesquelles ils n'ont pas pris en compte les temps de réglage.

Gahm, Dünwald et Sahamie (2014) ont proposé un algorithme à deux niveaux pour minimiser les délais de production et optimiser l'utilisation des ressources dans des environnements de production d'assemblage sur commande. Le premier niveau de cet algorithme était une heuristique qui distribuait de manière égale toutes les commandes sur l'horizon de planification.

Ensuite, dans le second niveau, une métaheuristique était employée pour optimiser la fonction objectif.

Une procédure de solution en deux étapes a été également présentée dans les travaux d'Ueno et al. (2012). Leur approche de résolution était intégrée à un système de planification et de gestion de la production de masse personnalisée et d'une recherche de voisinage à maillage variable. Le premier algorithme fondé sur la programmation linéaire permettait de trouver une solution approximative en utilisant le taux de commandes non exécutées. L'algorithme de recherche de voisinage à maillage variable avait pour objectif de générer un PDP qui minimise la somme du coût de production et du coût d'inventaire.

Cette revue de la littérature nous a permis de constater les points suivants qui n'ont pas été pris en compte dans les modèles d'optimisation du PDP : (1) la prise en compte de plusieurs goulets avec l'exploitation de plusieurs macro-gammes n'est pas traitée ; (2) la prise en compte d'opérateurs hétérogènes à l'intérieur des goulets n'a pas été retrouvée ; (3) la considération de l'évolution de l'efficacité des travailleurs n'a pas été modélisée ; (6) la durée de l'horizon de planification modélisé par les chercheurs reste courte par rapport à notre horizon (40 semaines) ; (5) peu de modèles ont été validés et comparés avec des données industrielles réelles. Ces aspects ont été pris en compte dans la modélisation et l'approche de résolution que nous présentons dans la section suivante.

### 6.3. Approche de résolution heuristique PDP

Nous présentons une approche de résolution pour le modèle mathématique présenté dans le Chapitre 5. Nous avons conçu à l'aide de MATLAB R2008b, un algorithme capable de proposer un PDP valable à partir de la date d'expédition des commandes, le retard actuel associé aux commandes des clients et la charge présente dans les goulets au moment de planifier. L'algorithme permet aussi au chef planificateur d'évaluer l'impact des décisions associées aux augmentations de la capacité disponible, au repositionnement d'opérateurs polyvalents, au licenciement d'employés dans l'horizon du PDP.

#### 6.3.1. Description du problème

Nous faisons rappel dans cette section aux hypothèses que nous avons évoquées dans la section III du chapitre 5. Nous tenons à préciser que l'algorithme heuristique que nous

présentons dans ce chapitre (6) constitue uniquement une nouvelle approche de résolution pour le problème que nous avons introduit dans le chapitre précédent.

L'objectif est de proposer un PDP qui minimise le retard dans l'expédition des commandes clients, dans un secteur de production avec deux lignes d'assemblage et neuf goulets ou postes de charges critiques dont deux postes automatisés et sept postes avec des opérateurs hétérogènes. Le secteur travaille sur une stratégie de production d'assemblage sur commande et la demande est déterministe dans l'horizon PDP.

Les références de produits finis ont été classées en trois macro-familles à partir d'une étude de macro-nomenclatures de production. En plus, quinze macro-gammes de fabrication (cf. Tableau 15 macro-gammes par macro-famille) ont été définies pour préciser les temps de fabrication et de réglage dans les goulets.

Nous avons considéré 5 hypothèses lors de la modélisation du problème. Ces hypothèses sont brièvement décrites par la suite :

- Capacité disponible variable : le chef planificateur peut modéliser les variations capacitaires en termes du nombre d'opérateurs disponible par période d'analyse (semaine ouvrable) et des facteurs d'efficacité par période d'analyse ;
- Charge existante : la charge des commandes en cours de fabrication dans les goulets est considérée au moment de proposer le PDP ;
- Retard existant : le retard des commandes en cours de fabrication au moment de proposer le PDP est pris en compte ;
- Disponibilité de matières et composants : nous n'avons pas modélisé les manquants en matières premières ni en sous-ensemble. Nous avons considéré qu'ils sont disponibles en début de traitement de la commande ; et
- Changements dans la date d'expédition demandés : nous avons considéré la possibilité de changer la date d'expédition des commandes, mais nous n'avons pas considéré l'annulation des commandes.

### 6.3.2. Etapes de l'algorithme

Nous décrivons dans cette section les étapes que l'algorithme suit pour proposer un PDP en fonction de la date d'expédition la plus proche.

### 1. Définition des valeurs initiales des paramètres PDP

Dans un premier temps nous avons défini les valeurs des paramètres, listés par la suite, à partir des données réelles de l'entreprise :

- La date d'expédition de chaque commande client (définis la séquence de planification des commandes) ;
- La quantité demandée par commande client ;
- Le type de produit fini demandé par commande client ;
- La macro-gamme associée au produit fini demandé par commande client ;
- Les temps de fabrication dans les goulets pour les différentes macro-gammes ;
- Les temps de réglage dans les goulets pour les différentes macro-gammes ;
- La capacité (en nombre de minutes) dans les goulets par période d'analyse. Ce paramètre est calculé à partir du nombre d'opérateurs, la moyenne de facteurs d'efficacité et le temps effectif disponible par période d'analyse ;
- La longueur de l'horizon de planification en nombre de périodes d'analyse ; et
- La date de planification.

Une fois la valeur de ces paramètres définie, l'algorithme suit les étapes que nous présentons par la suite dans le but de proposer un PDP pour l'horizon de planification.

### 2. Début de planification de la commande

L'algorithme commence à planifier le traitement de la commande avec la date d'expédition la plus proche par rapport la date de planification. En fonction de la macro-gamme associée au produit commandé, le premier goulet est identifié.

### 3. Calcul de charge dans les postes critiques et comparaison à la capacité disponible

Dans cette étape l'algorithme effectue une comparaison entre la charge associée au traitement de la commande et la capacité disponible dans le goulet. Deux cas de figure se présentent lors de cette analyse :

- La valeur de la charge (en unité de temps) est inférieure à la valeur de la capacité disponible (en unité de temps). Dans ce cas, l'algorithme calcule le temps de fin de traitement de la commande dans ce goulet. Ensuite, le temps de début de traitement de

la commande dans le goulet suivant est calculé. Finalement, une mise à jour de la capacité disponible dans le goulet actuel est effectuée ; et

- La valeur de la charge (en unité de temps) est supérieure à la valeur de la capacité disponible (en unité de temps) – condition de surcharge. L’algorithme calcule la quantité maximale qui peut être fabriquée dans la semaine en cours (possible à fabriquer). Le temps de fin de traitement du possible à fabriquer est calculé. La valeur de la capacité disponible dans le goulet, pour la semaine en cours, est mise à jour. Ensuite, l’algorithme calcule le restant à fabriquer pour la semaine suivante. La semaine de fin de traitement du restant à fabriquer est déterminée. Finalement, l’algorithme indique le temps de fin de traitement de la totalité de la commande dans le goulet actuel et le temps de début de traitement de la commande dans le goulet suivant.

#### 4. Fin de planification de la commande

Les étapes 2 et 3 sont répétées pour les goulets restants de la macro-gamme de fabrication associée à la commande. Une fois la planification est complétée pour le dernier goulet, la semaine de fin de fabrication de la commande est calculée.

#### 5. Mise à jour de la capacité

Une fois la planification de la commande en cours d’analyse est finie, la capacité disponible dans l’ensemble des goulets est mise à jour. Les créneaux d’occupation et de disponibilité des goulets sont également calculés.

#### 6. Planification des commandes suivantes

En fonction de la disponibilité des goulets et de la macro-gamme, l’algorithme planifie la commande suivante.

L’algorithme répète les étapes 2, 3 et 4, sachant que le calcul de temps de début et de fin de traitement de la commande dépend des conditions suivantes :

- Le temps de début de traitement de la commande dans un goulet sera le maximum entre le temps de fin de traitement de la commande dans le goulet précédent et le temps de fin de traitement de la commande précédente dans ce goulet ; et

- Le temps de fin de traitement de la commande dans un goulet est la somme du temps de début de traitement de la commande dans ce goulet plus le temps de traitement de la commande

$$(temps\ de\ fabrication\ *\ restante\ à\ fabriquer) + temps\ de\ réglage$$

Pour les postes de charge automatisés, le calcul du temps de traitement est différent. Ces postes permettent de traiter les produits d'une même commande de façon simultanée. La quantité maximale d'unités qui peuvent être traitées en même temps est la seule contrainte.

#### 7. Calcul du retard/avancement sur l'expédition de la commande

À partir de la semaine de fin de fabrication de la commande dans le dernier goulet de sa macro-gamme, l'algorithme peut estimer la date d'expédition. Une comparaison entre la date d'expédition proposée par l'algorithme et la date d'expédition promise au client permet de calculer le retard ou l'avancement associé à la commande.

Une fois la planification du traitement des commandes dans l'horizon de planification est complétée, les données de sortie de l'algorithme sont :

- Un plan de production au niveau de détail de commandes clients. Ce plan indique la semaine de début de traitement de la commande et la semaine d'expédition ;
- Le retard ou l'avancement associé à chaque commande ; et
- Un rapport de charges globales par période d'analyse (semaine).

L'algorithme heuristique propose un PDP tout en permettant de :

- Lancer le traitement simultané des deux commandes quand leurs macro-gammes ne présentent pas de conflits (goulets alloués par la macro-gamme) ;
- Exploiter 15 macro-gammes différentes ;
- Étaler la production des commandes à plusieurs semaines dans un même goulet, en fonction de la capacité ; et
- Respecter la fabrication par lot dans les goulets.

### 6.3.3. Tests - Plan d'expériences

Dans un premier temps nous allons utiliser les onze derniers tests lancés avec l'approche exacte (cf. Tableau 18 - valeurs de paramètres par test) pour comparer la performance de notre algorithme heuristique par rapport à l'approche exacte. Ensuite, nous allons incrémenter la taille de ces tests, de dix en dix commandes à planifier, pour pouvoir atteindre les paramètres cibles du PDP de notre partenaire industriel, soit un horizon de planification de 40 semaines ouvrables, 250 commandes clients à planifier et plus de 20 000 unités de produits finis à fabriquer.

Nous présentons pour les tests lancés dans le tableau 25, la valeur des paramètres suivants : nombre de commandes à planifier (n), quantité totale demandée en nombre d'unités (Q) et longueur de l'horizon de planification.

Test	Nombre de commandes (n)	Quantité totale demandée (Q)	Horizon de planification (d)	Test	Nombre de commandes (n)	Quantité totale demandée (Q)	Horizon de planification (d)
1	30	6556	10	19	120	13 016	18
2	31	6856	11	20	130	13 442	18
3	32	6866	11	21	140	13 821	18
4	33	7166	12	22	150	14 816	18
5	34	7466	13	23	160	15 343	21
6	35	7516	13	24	170	15 954	22
7	36	7657	13	25	180	17 159	24
8	37	7863	14	26	190	17 957	25
9	38	8213	14	27	200	18 428	28
10	39	8263	16	28	210	19 215	29
11	40	8343	17	29	220	20 144	30
12	50	9159	17	30	230	20 848	31
13	60	9697	17	31	240	21 345	33
14	70	10 211	17	32	250	21 885	34
15	80	10 962	17	33	260	22 690	35
16	90	11 412	17	34	270	23 402	36
17	100	11 934	17	35	280	23 993	38
18	110	12 375	18	36	290	24 370	39
				Le plus grand test	298	24 671	40

Tableau 25 : Valeur de paramètres par test

## 6.4. Résultats

Nous présentons dans un premier temps les résultats de la valeur de la fonction objectif pour l'approche heuristique. Nous comparons d'abord la valeur du retard total pour les 11 premiers tests, avec la valeur que nous avons obtenue avec l'approche exacte. Pour les autres tests, nous

comparons la valeur du retard obtenu avec le PDP proposé par l'approche heuristique et la planification réelle de notre partenaire industriel. Dans un deuxième temps nous présentons les résultats du temps de calcul de l'heuristique. Dans un troisième temps, nous présentons les résultats par date d'expédition des commandes. Finalement, nous aborderons l'analyse de l'utilisation capacitaire.

#### 6.4.1. Retard

Nous avons comparé pour les 11 premiers tests la valeur du retard total cumulé pour le PDP proposé par les approches exacte et heuristique. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 26. Pour l'approche heuristique, neuf parmi ces onze tests ont proposé un PDP avec une amélioration de la valeur du retard cumulé par rapport à la planification réelle.

Une analyse de l'écart existant entre la valeur du retard de l'approche exacte et heuristique nous a permis de trouver une valeur moyenne de 14 %. Le PDP proposé par l'heuristique pour ces tests est en conséquence valable et permet de réduire la valeur du retard réel, mais il n'est pas optimal. Toutefois, l'analyse de l'utilisation de la capacité disponible et d'écarts entre les dates d'expédition au niveau de commandes que nous présentons dans les sections suivantes nous permettra d'évaluer la performance de notre heuristique par rapport à d'autres critères.

Test	Retard total réel (semaines ouvrables)	Retard total exact (semaines ouvrables)	Retard total heuristique (semaines ouvrables)	Écart exact heuristique	Pourcentage amélioration approche heuristique
1	39	33	34	3 %	13 %
2	48	41	44	9 %	8 %
3	54	46	53	16 %	2 %
4	62	54	63	18 %	0 %
5	69	64	72	16 %	0 %
6	98	69	81	20 %	17,3 %
7	114	78	90	20 %	21 %
8	121	90	99	17 %	18,2 %
9	127	109	108	8 %	15 %
10	136	111	114	13 %	16,2 %
11	137	109	119	19 %	13 %

Tableau 26 : Comparaison retard PDP réel, PDP exacte et PDP heuristique

Etant donné que le plus grand test que nous avons pu lancer avec l'approche exacte était le test 11 qui comportait 40 commandes à planifier, pour les tests restants nous avons comparé la valeur du retard réel avec la valeur du retard associé au PDP proposé par l'approche heuristique. Le tableau 27 contient la valeur du retard pour les tests 12-36.

Pour tous les tests 12- 36, le PDP proposé par l'approche heuristique a permis de réduire la valeur du retard réel. L'amélioration moyenne de la valeur du retard est de 26 %. Nous considérons qu'une analyse de la capacité disponible dans les goulets pourrait permettre au chef planificateur d'avoir des résultats encore plus performants par rapport à ceux que nous avons présentés dans le Tableau 27.

Test	Retard total réel (semaines ouvrables)	Retard total heuristique (semaines ouvrables)	Pourcentage amélioration approche heuristique
12	155	153	1,3 %
13	166	165	0,6 %
14	198	168	15,2 %
15	206	176	14,6 %
16	221	176	20,4 %
17	232	176	24,1 %
18	236	186	21,2 %
19	275	186	32,4 %
20	275	186	32,4 %
21	281	186	33,8 %
22	303	186	38,6 %
23	307	196	36,2 %
24	307	196	36,2 %
25	323	218	32,5 %
26	327	218	33,3 %
27	328	252	23,2 %
28	332	252	24,1 %
29	345	252	27. %
30	347	252	27,4 %
31	364	252	30,8 %
32	374	252	32,6 %
33	381	252	33,9 %
34	381	281	26,2 %
35	382	281	26,4 %
36	396	281	29 %
37	396	281	29 %

Tableau 27 : Comparaison retard PDP réel versus heuristique

Pour compléter l'analyse du retard (fonction objectif), nous allons présenter une comparaison entre les dates d'expédition proposées par le PDP de l'approche heuristique et les dates d'expédition demandées. Nous avons conduit cette analyse dans un test de petite taille (40 commandes à planifier), un test de taille moyenne (150 commandes à planifier) et le plus grand test que nous avons lancé (298 commandes).

Dans les tableaux 28-30, nous présentons le détail de cette analyse pour le plus grand test.

Commande	Début fabrication	Date expédition			Commande	Début fabrication	Date expédition		
	modèle	modèle	demandée	Statut date expédition		modèle	modèle	demandée	Statut date expédition
1	1	1	-6	retard	46	2	9	4	retard
2	1	1	-5	retard	47	2	10	4	retard
3	1	1	-11	retard	48	2	10	5	retard
4	1	1	-2	retard	49	2	10	5	retard
5	1	1	2	avance	50	2	10	5	retard
6	1	1	3	avance	51	2	10	5	retard
7	1	1	4	avance	52	2	10	5	retard
8	1	2	7	avance	53	2	10	5	retard
9	1	2	2	égale	54	2	10	6	retard
10	1	2	2	égale	55	2	10	6	retard
11	1	2	-3	retard	56	2	10	6	retard
12	1	2	2	égale	57	2	10	6	retard
13	1	2	20	avance	58	2	10	6	retard
14	1	2	4	avance	59	2	10	6	retard
15	1	3	6	avance	60	2	10	7	retard
16	1	3	6	avance	61	2	10	7	retard
17	1	3	6	avance	62	2	10	7	retard
18	1	3	6	avance	63	2	10	7	retard
19	1	3	9	avance	64	2	10	8	retard
20	1	3	2	retard	65	2	10	8	retard
21	1	3	18	avance	66	2	10	8	retard
22	1	3	4	avance	67	2	10	8	retard
23	1	4	9	avance	68	2	10	8	retard
24	1	4	12	avance	69	2	10	8	retard
25	1	5	15	avance	70	2	10	8	retard
26	1	5	11	avance	71	2	10	9	retard
27	1	5	22	avance	72	2	10	9	retard
28	1	5	24	avance	73	2	10	9	retard
29	1	6	25	avance	74	2	11	9	retard
30	1	6	6	égale	75	2	11	9	retard
31	1	6	-5	retard	76	2	11	9	retard
32	1	6	-4	retard	77	3	11	9	retard
33	1	7	-4	retard	78	2	11	9	retard
34	1	7	-3	retard	79	2	11	10	retard
35	1	8	-3	retard	80	3	11	10	retard
36	2	8	-3	retard	81	3	11	10	retard
37	2	8	-3	retard	82	3	11	10	retard
38	2	9	-2	retard	83	3	11	10	retard
39	2	9	1	retard	84	3	11	10	retard
40	2	9	2	retard	85	3	11	10	retard
41	2	9	2	retard	86	3	11	10	retard
42	2	9	2	retard	87	3	11	10	retard
43	2	9	3	retard	88	3	11	11	égale
44	2	9	3	retard	89	3	11	11	égale
45	2	9	3	retard	90	3	12	11	retard

Tableau 28 : Plan de production proposé par l'heuristique et comparaison dates d'expédition modèle versus demandée test 37- commandes 1-90

Commande	Début fabrication	Date expédition			Commande	Début fabrication	Date expédition		
	modèle	modèle	demandée	Statut date expédition		modèle	modèle	demandée	Statut date expédition
91	3	12	12	égale	143	4	14	18	avance
92	3	12	12	égale	144	4	14	18	avance
93	3	12	12	égale	145	4	14	18	avance
94	3	12	12	égale	146	4	14	18	avance
95	3	12	12	égale	147	4	14	18	avance
96	3	12	12	égale	148	4	14	18	avance
97	3	12	12	égale	149	4	15	18	avance
98	3	12	12	égale	150	4	15	18	avance
99	3	12	12	égale	151	4	15	18	avance
100	3	12	12	égale	152	4	15	18	avance
101	3	12	12	égale	153	4	15	19	avance
102	3	12	12	égale	154	5	15	19	avance
103	3	12	12	égale	155	5	15	19	avance
104	3	12	12	égale	156	5	15	20	avance
105	3	12	12	égale	157	5	15	20	avance
106	3	12	13	avance	158	5	15	20	avance
107	3	12	13	avance	159	5	15	21	avance
108	3	12	13	avance	160	5	15	21	avance
109	3	12	13	avance	161	5	15	21	avance
110	3	12	13	avance	162	5	15	21	avance
111	3	12	13	avance	163	5	15	21	avance
112	3	12	14	avance	164	5	15	21	avance
113	4	12	14	avance	165	5	15	22	avance
114	3	12	14	avance	166	5	15	22	avance
115	3	13	14	avance	167	5	15	22	avance
116	4	13	14	avance	168	5	15	22	avance
117	4	13	14	avance	169	5	15	22	avance
118	4	13	14	avance	170	5	15	22	avance
119	4	13	14	avance	171	5	16	23	avance
120	4	13	15	avance	172	5	16	23	avance
121	4	13	15	avance	173	5	16	23	avance
122	4	13	15	avance	174	5	16	23	avance
123	4	13	15	avance	175	5	16	23	avance
124	4	13	15	avance	176	5	16	23	avance
125	4	13	15	avance	177	5	16	23	avance
126	4	13	15	avance	178	5	16	24	avance
127	4	13	15	avance	179	5	16	24	avance
128	4	13	16	avance	180	5	17	24	avance
129	4	13	16	avance	181	5	17	24	avance
130	4	13	16	avance	182	5	17	24	avance
131	4	13	16	avance	183	5	17	25	avance
132	4	13	16	avance	184	6	17	25	avance
133	4	14	16	avance	185	5	17	25	avance
134	4	14	16	avance	186	5	17	25	avance
135	4	14	16	avance	187	5	17	25	avance
136	4	14	16	avance	188	5	17	25	avance
137	4	14	16	avance	189	5	17	25	avance
138	4	14	17	avance	190	6	17	25	avance
139	4	14	17	avance	191	6	17	26	avance
140	4	14	17	avance	192	6	17	26	avance
141	4	14	18	avance	193	6	17	26	avance
142	4	14	18	avance	194	6	17	27	avance

Tableau 29 : Plan de production proposé par l'heuristique et comparaison dates d'expédition modèle versus demandée  
test 37- commandes 91-194

Commande	Début fabrication	Date expédition			Commande	Début fabrication	Date expédition		
	modèle	modèle	demandée	Statut date expédition		modèle	modèle	demandée	Statut date expédition
195	6	17	27	avance	247	7	20	33	avance
196	6	17	27	avance	248	7	20	33	avance
197	6	18	27	avance	249	7	20	34	avance
198	6	18	27	avance	250	7	21	34	avance
199	6	18	27	avance	251	7	21	34	avance
200	6	18	28	avance	252	7	21	34	avance
201	6	18	28	avance	253	7	21	34	avance
202	6	18	28	avance	254	7	21	34	avance
203	6	18	28	avance	255	7	21	34	avance
204	6	18	28	avance	256	7	21	34	avance
205	6	18	28	avance	257	7	21	34	avance
206	6	18	28	avance	258	7	21	35	avance
207	6	18	28	avance	259	7	21	35	avance
208	6	18	28	avance	260	7	21	35	avance
209	7	18	28	avance	261	7	21	35	avance
210	6	18	29	avance	262	7	21	35	avance
211	6	18	29	avance	263	7	21	35	avance
212	6	18	29	avance	264	7	21	35	avance
213	6	18	29	avance	265	7	21	36	avance
214	6	18	29	avance	266	8	21	36	avance
215	6	18	29	avance	267	8	22	36	avance
216	7	18	29	avance	268	8	22	36	avance
217	6	18	30	avance	269	8	22	36	avance
218	7	19	30	avance	270	8	22	36	avance
219	7	19	30	avance	271	8	22	36	avance
220	6	19	30	avance	272	8	22	36	avance
221	6	19	30	avance	273	8	22	37	avance
222	7	19	30	avance	274	8	22	37	avance
223	6	19	31	avance	275	8	22	37	avance
224	6	19	31	avance	276	8	22	37	avance
225	6	19	31	avance	277	8	22	37	avance
226	6	19	31	avance	278	8	22	37	avance
227	7	19	31	avance	279	8	22	38	avance
228	7	20	31	avance	280	8	22	38	avance
229	7	20	31	avance	281	8	22	38	avance
230	7	20	31	avance	282	8	23	38	avance
231	7	20	32	avance	283	8	23	38	avance
232	7	20	32	avance	284	8	23	38	avance
233	7	20	32	avance	285	8	23	39	avance
234	7	20	32	avance	286	8	23	39	avance
235	7	20	32	avance	287	8	23	39	avance
236	7	20	32	avance	288	8	23	39	avance
237	7	20	32	avance	289	8	23	39	avance
238	7	20	32	avance	290	8	23	39	avance
239	7	20	32	avance	291	8	23	39	avance
240	7	20	33	avance	292	8	23	39	avance
241	7	20	33	avance	293	8	23	39	avance
242	7	20	33	avance	294	8	23	40	avance
243	7	20	33	avance	295	8	23	40	avance
244	7	20	33	avance	296	8	23	40	avance
245	7	20	33	avance	297	8	23	40	avance
246	7	20	33	avance	298	8	23	40	avance

Tableau 30 : Plan de production proposé par l'heuristique et comparaison dates d'expédition modèle versus demandée  
test 37- commandes 195-298

Dans ces tableaux les dates de début de fabrication et d'expédition ont été calculées en nombre de semaines ouvrables par rapport à la date de planification. Une valeur négative dans la date d'expédition réelle représente la valeur du retard de la commande au moment de planifier. La colonne « statut expédition » permet au chef planificateur de vérifier si la date d'expédition proposée par le PDP heuristique est en avance, en retard ou est égale à la date d'expédition demandée par le client.

L'analyse des dates d'expédition proposées par l'heuristique par rapport à la date d'expédition demandée pour le test 11, 40 commandes à planifier, a révélé que le PDP proposé par l'approche heuristique permet de compléter 21 commandes en avance par rapport à la date d'expédition demandée par le client. Le retard total cumulé de 119 semaines du PDP proposé par l'heuristique porte sur 16 commandes, dont 13 commandes avec un retard préalable au moment de la planification. Le PDP proposé par l'approche heuristique pour ce test permet de réduire le retard réel en 18 semaines et 9 commandes.

Pour le test 22, 150 commandes à planifier, le PDP proposé par l'approche heuristique propose une date d'expédition en avance par rapport à la date demandée par le client pour 92 commandes. Un retard cumulé de 186 semaines du PDP proposé par l'heuristique est associé à 39 commandes dont 13 commandes avec un retard préalable au moment de planifier. Par rapport à la planification réelle, le PDP proposé par l'heuristique pour ce test réduit le retard réel en 117 semaines et 26 commandes.

Finalement, pour le plus grand test, 298 commandes à planifier, le PDP proposé par notre algorithme heuristique, présente un avancement dans la date d'expédition de 213 commandes. Le retard cumulé de ce test est de 281 semaines avec 64 commandes en retard, dont 13 avec un retard préalable. Avec la planification réelle, le retard cumulé était de 396 semaines et portait sur 96 commandes. Le PDP proposé par l'algorithme heuristique permet de réduire le retard en 115 semaines et de 32 commandes.

Les analyses détaillées sur le retard dans les trois tests nous permettent de conclure que la diminution du retard proposé par le PDP heuristique n'augmente pas avec le nombre de commandes à planifier. Dans le PDP proposé par l'heuristique pour 150 commandes à planifier, la réduction du retard était de 117 semaines alors que pour 298 commandes à planifier le retard

était de 115 semaines. En revanche, le nombre de commandes pour lequel le PDP proposé par l'heuristique a diminué le retard augmente avec le nombre de commandes à planifier. Pour le test de 40 commandes, le PDP heuristique a permis de diminuer le retard sur 9 commandes par rapport à la planification réelle. Ensuite, pour le test de 150 commandes, la réduction du retard portait sur 26 commandes. Finalement, pour le test de 298 commandes, le retard a été diminué sur 32 commandes.

La réduction du retard entre le PDP proposé par l'approche heuristique et la planification réelle, montrent que l'exploitation de notre modèle et de cette approche de résolution permettent d'atteindre la minimisation du retard désirée par notre partenaire industriel.

#### 6.4.2. Temps de calcul

Nous présentons les résultats du temps de calcul pour tous les tests que nous avons conduit pour valider les propositions de l'approche heuristique dans le Tableau 31.

Test	Temps de calcul exact(s)	Temps de calcul heuristique(s)	Test	Temps de calcul heuristique(s)
1	2,8	0,009	19	0,05
2	15,12	0,009	20	0,05
3	16,82	0,01	21	0,06
4	42,41	0,02	22	0,06
5	130,9	0,01	23	0,07
6	163,02	0,01	24	0,08
7	>2000 s	0,01	25	0,08
8	>2000 s	0,01	26	0,09
9	>4000 s	0,01	27	0,09
10	>2000 s	0,02	28	0,1
11	>15 000 s	0,01	29	0,11
12		0,12	30	0,11
13		0,02	31	0,12
14		0,02	32	0,12
15		0,03	33	0,17
16		0,03	34	0,13
17		0,05	35	0,14
18		0,05	36	0,08
			Le plus grand test	0,15

Tableau 31 : Temps de calcul par test

Les temps de calcul de l'approche heuristique varient très peu avec la taille du test ou bien le nombre de commandes à planifier. A la différence du temps de calcul de l'approche exacte, que nous présentons dans le Tableau 31 pour les 11 premiers tests, le temps de calcul de l'approche heuristique était plutôt stable avec une valeur moyenne de 0,06 seconde.

Les résultats du temps de calcul de l'approche heuristique permettent de constater que le changement d'approche de résolution que nous avons envisagé dans les conclusions du chapitre précédentes était cohérent. Notre algorithme heuristique permettra au chef planificateur d'obtenir un PDP avec une analyse de charges globales rapidement.

### 6.4.3. Utilisation de la capacité

L'analyse de charges globales constitue un élément important dans le processus PDP. Cette analyse comporte la comparaison entre la charge existante et la capacité disponible dans les postes de charge goulets et permet au chef planificateur d'évaluer la faisabilité du PDP.

Dans notre modèle nous avons identifié 9 goulets. Nous avons gardé le nombre de goulets à analyser comme un paramètre stable dans l'ensemble des tests que nous avons lancé avec l'approche de résolution heuristique. Nous présentons les résultats de l'analyse du rapport de charges globales pour trois tests de taille petite (40 commandes), taille moyenne (150 commandes) et le plus grand test (298 commandes), dans les tableaux 32-35.

	Horizon de fabrication (semaines ouvrables)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K1	100 %	7 %								
K2	13 %									
K3	100 %	30 %								
K4	88 %	100 %	51 %							
K5	84 %	100 %	100 %	100 %	66 %					
K6	1,2 %	0,4 %	1,0 %	0,8 %	0,6 %					
K7	25 %	14 %	15 %	12 %	9 %					
K8	91 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	21 %			
K9	19 %	17 %	10 %	13 %	11 %	16 %	5 %			

Tableau 32 : Analyse de charges globales test 11- 40 commandes à planifier

Dans le test 11, l'horizon de planification était de 17 semaines. L'analyse des charges globales présentées dans le tableau 32 indique que toutes les commandes peuvent être fabriquées dans un horizon de 7 semaines (horizon de fabrication). Parmi les 40 commandes, il y avait 17 commandes en cours de fabrication (charge existante) et 23 commandes à planifier. Les postes de charges K5 et K8 présentent le pourcentage d'utilisation capacitaire plus élevé parmi les 9 goulets analysés. Les postes K1, K2 et K3 ont une capacité sous-utilisée à partir de la troisième semaine de fabrication. Ce type d'analyses permettrait, par exemple, au chef planificateur de

repositionner les collaborateurs polyvalents dans les postes de charge ayant une utilisation élevée de la capacité disponible.

Comme 40 commandes ne représentent que 13 % de commandes à planifier, nous présentons une analyse de charges globales pour un nombre supérieur de commandes à planifier (150 commandes) dans le tableau 33.

	Horizon de fabrication (semaines ouvrables)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
K1	100 %	100 %	100 %	88 %									
K2	13 %	29 %	82 %	23 %									
K3	100 %	87 %	7 %	36 %									
K4	88 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	95 %						
K5	84 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	30 %			
K6	1 %	0,4 %	0,05 %	0,5 %	1 %	1 %	5 %	6 %	6 %				
K7	25 %	14 %	2 %	6 %	17 %	17 %	68 %	75 %	86 %	3 %			
K8	91 %	100 %	100 %	100 %	96 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	13 %
K9	19 %	17 %	10 %	13 %	7 %	18 %	15 %	8 %	9 %	7 %	4 %	4 %	5 %

Tableau 33 : Analyse de charges globales test 22- 150 commandes à planifier

Pour le test 22, 150 commandes représentent 100 % de commandes à planifier dans l’horizon de 18 semaines. L’analyse des charges globales affichées dans le tableau 34 permet d’identifier à nouveau une utilisation de la capacité de 100 % dans les goulets 5 et 8. A la différence des résultats présentés dans le tableau 33, le goulet 4 présente lui aussi une utilisation supérieure de la capacité disponible.

Le PDP proposé par l’approche heuristique pour ce test et l’analyse des charges globales indiquent que l’ensemble des commandes peut être traité dans un délai de 13 semaines. Néanmoins, avec la capacité disponible le retard cumulé est de 186 semaines ouvrable avec un nombre total de 39 commandes expédiées en retard.

L’impact des décisions telles que : l’augmentation du nombre de collaborateurs et le repositionnement des collaborateurs polyvalents, sur le retard cumulé et au niveau de commandes, pourrait être analysé par le chef planificateur à l’aide de notre algorithme heuristique.

Nous présentons l'analyse de charges globales pour le test 37, 298 commandes à planifier dans un horizon de 40 semaines, dans les tableaux 34 et 35.

	Horizon de fabrication (semaines ouvrables)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K1	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	81 %				
K2	13 %	29 %	82 %	23 %	69 %	100 %	58 %	46 %				
K3	100 %	87 %	7 %	36 %	54 %	16 %	88 %	23 %				
K4	88 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
K5	84 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
K6	1 %	0,4 %		0,5 %	1 %	0,1 %			4 %	5 %	8 %	4 %
K7	25 %	14 %	2 %	6 %	13 %	3 %	2 %	2 %	59 %	61 %	109 %	50 %
K8	91 %	100 %	100 %	100 %	83 %	64 %	63 %	40 %	87 %	100 %	100 %	100 %
K9	19 %	17 %	10 %	13 %	7 %	5 %	10 %	7 %	12 %	9 %	8 %	8 %

Tableau 34 : Analyse de charges globales test 37- 298 commandes à planifier – Partie 1

	Horizon de fabrication (semaines ouvrables)											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
K1												
K2												
K3												
K4	100 %	98 %										
K5	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	17 %						
K6	2 %	5 %	2 %	4 %	5 %	2 %						
K7	26 %	69 %	30 %	62 %	67 %	20 %						
K8	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	48 %	
K9	5 %	3 %	13 %	15 %	7 %	11 %	15 %	7 %	8 %	9 %	3 %	

Tableau 35 : Analyse de charges globales test 37- 298 commandes à planifier – Partie 2

Les résultats présentés dans les tableaux 34 et 35 montrent que les postes de charge K4, K5 et K8 ont le pourcentage d'utilisation capacitaire le plus élevé parmi les goulets analysés. À l'aide de ces résultats, le chef planificateur pourrait prendre des décisions sur la gestion de la capacité disponible de façon anticipée. Ceci lui permettrait de diminuer et peut être éviter avoir du retard sur l'expédition des commandes clients.

Les goulets K4 et K5 font partie de toutes les macro-gammes que nous avons considérées dans notre étude (cf. Tableau 15 macro-gammes par Macro-Famille) et le poste K8 fait partie de 12 macro-gammes parmi 15. Il est en conséquence cohérent que ces postes présentent des pourcentages d'utilisation capacitaire plus élevés par rapport aux autres goulets. Ils nécessitent en conséquence une attention particulière de la part du chef planificateur.

Nous avons validé les PDP proposés par l'approche heuristique à partir de la comparaison de la valeur du retard calculé et du retard réel cumulé. Pour les tests de taille moyenne et grande (tests 12-37), le PDP proposé par l'algorithme heuristique permet de réduire de façon considérable le retard réel en nombre de semaines et nombre de commandes. L'approche heuristique propose un PDP et une analyse de charges globales dans un temps de calcul raisonnable.

Nous avons ainsi validé les propositions de l'approche heuristique en faisant une comparaison entre les dates d'expédition demandées par les clients et les dates d'expédition proposées par le PDP de notre approche. En effet, le plan de production présenté dans les tableaux 28-30 indique les dates de début de traitement et d'expédition au niveau de détail des commandes. Le statut de la date d'expédition permet au chef planificateur d'identifier facilement les commandes pour lesquels des actions doivent être lancées (statut « retard »).

Finalement, l'analyse des charges globales proposée par l'algorithme permet de vérifier que les contraintes capacitaires sont respectées. De plus, les résultats de cette analyse constituent une bonne base pour la prise de décisions du chef planificateur associées à la capacité.

## 6.5. Conclusion

L'algorithme heuristique que nous avons présenté dans ce chapitre permet de proposer un PDP pour l'horizon de planification défini par notre partenaire industriel (40 semaines ouvrables) en respectant les contraintes capacitaires et de fabrication par lots du site de production étudiée, dans un temps de calcul raisonnable.

L'objectif principal défini par le partenaire industriel était la minimisation du retard cumulé sur l'expédition des commandes clients. Les tests que nous avons conduits pour valider l'algorithme nous ont permis de démontrer que le PDP proposé par notre heuristique permet de diminuer le retard cumulé sur l'expédition grâce à une utilisation optimale de la capacité disponible. En plus, l'analyse de charges globales proposées par l'algorithme constitue un outil fondamental dans le processus de validation du PDP.

L'exploitation de notre algorithme heuristique muni le chef planificateur d'un outil capable de :

- Proposer un PDP valable ;
- Conduire une analyse de charges globales ; et
- Évaluer l'impact des décisions sur la capacité disponible et des variations capacitaires.

À la différence du PDP proposé par les ERP X3 qui considèrent une capacité infinie notre algorithme propose un PDP sur la base de la capacité disponible. L'intégration du PDP proposé par notre algorithme heuristique dans l'ERP du partenaire industriel permettrait de lancer les CBN sur la base d'un plan de production valable. Ainsi, il sera plus probable d'avoir les composants, sous-ensembles et matières premières au moment de lancer la fabrication des commandes.

L'exploitation du PDP dans l'ERP permettrait aussi aux responsables commerciales de mieux négocier la date d'expédition des commandes avec les clients. Le chef planificateur à l'aide de notre algorithme peut indiquer en quelques minutes la possibilité d'expédier une commande pour une date précise.

L'approche de résolution que nous avons présentée pour répondre à la problématique du PDP ne présente aucun coût pour le partenaire industriel. Les valeurs des paramètres (données d'entrée de l'algorithme) peuvent être extraites de l'ERP et nous avons utilisé une licence MATLAB détenue par le partenaire pour programmer notre algorithme.

Nous présentons comme perspective le lien entre certains groupes technologiques 4.0 et notre algorithme. Des données de suivi des flux de production à travers l'internet des objets pourraient être exploitées pour mieux définir les temps de fabrication et de réglage des macro-programmes. Ceci permettrait de proposer un PDP avec une adhérence plus élevée. Il serait également envisageable, d'employer la simulation pour générer différents scénarios de capacité disponible et lancer les calculs de notre algorithme sur cette base.

Notre algorithme comporte certaines limites. Nous avons mesuré pour les tests 1 à 11 l'écart entre la valeur du retard cumulé de l'heuristique et de l'approche exacte. Pour ces 11 tests, l'écart de la valeur du retard est important. Il serait en conséquence pertinent de porter des changements sur l'algorithme heuristique pour se rapprocher plus des valeurs optimales de la fonction objectif.

Une autre limitation concerne les inventaires de produit fini. Le PDP proposé par l'approche heuristique permet d'expédier de nombreuses commandes clients en avance par rapport à la date d'expédition demandée. En fonction du nombre de semaines d'avance il faudra trouver un d'accord avec les clients pour livrer les commandes en avance ou bien de la place pour stocker les produits finis. Il est envisageable en conséquence de considérer dans des versions futures de l'algorithme, un changement dans la fonction objectif pour inclure la minimisation du niveau d'inventaire ou bien des coûts d'inventaire de produit fini.

Même si notre algorithme permet au chef planificateur d'analyser l'impact des variations capacitaires sur le PDP, aucune valeur n'a pas été associée au licenciement ou à l'embauche d'opérateurs. Des versions futures du modèle devraient considérer ces coûts dans la fonction objectif.

# Conclusion

Notre objectif principal était de développer une approche de planification de la production à moyen terme pour les PME manufacturières dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Nous cherchions à guider la transformation du processus PDP pour la rendre plus agile. Nous avons proposé quatre objectifs spécifiques pour parvenir à notre objectif principal.

Notre premier objectif était d'identifier les approches de planification de la production 4.0 les plus adaptées au contexte industriel des PME pour le processus PDP. Nous avons conduit une revue de la littérature des publications académiques que nous a permis d'identifier que très peu d'approches de planification traitées des PME et les activités de planification à moyen terme. La majorité des approches de planification 4.0 retrouvées dans la littérature académique portaient sur des horizons à court terme et n'indiquaient pas la taille de l'entreprise à laquelle ils s'adressent. Cet objectif est partiellement atteint. Une extension de l'État de l'Art vers les approches de planification menées par les industriels pourrait permettre de recenser plus de cas d'application des technologies 4.0 dans les activités de planification de la production.

Notre deuxième objectif était de caractériser le besoin industriel lié au processus de planification de la production à moyen terme. Cet objectif est atteint à travers l'élaboration de l'Étude Delphi-Régner que nous avons conduite au sein de l'entreprise. Nous avons identifié les difficultés associées au processus PDP. Ensuite, nous avons proposé trois axes d'amélioration principaux, la standardisation du processus, l'association des dimensions d'agilité au processus et la mise en place des outils de support à la prise de décisions.

Notre troisième objectif était de proposer un modèle d'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP des PME manufacturières. Cet objectif est atteint au travers d'un atelier de travail collaboratif avec des experts 4.0. Nous avons proposé un PDP 4.0 proposant l'intégration des technologies 4.0 qui permet d'apporter de l'agilité à ce processus. Nous avons fait appel aux connaissances d'experts en industrie 4.0 par manque d'études relatives aux approches de planification 4.0 pour des horizons à moyen terme que nous avons constatées dans la revue de la littérature. Il était complexe de récupérer des informations par étude des cas.

La modélisation du processus PDP standard que nous avons pris comme base de travail pour la sélection des activités sensibles à être améliorées par le numérique permettra d'utiliser le

processus PDP 4.0 comme guide dans d'autres PME manufacturières. Nous avons modélisé en détail les activités des différents acteurs, ainsi que les livrables et les sources des données de ce processus. Les groupes technologiques que nous proposons constituent une base pour que les entreprises puissent faire le choix de technologies à déployer.

Notre quatrième objectif était de concevoir un outil support pour la prise de décisions du chef planificateur dans le processus PDP des PME manufacturières. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé deux approches d'optimisation du PDP pour des contextes de production d'assemblage sur commande, avec plusieurs goulets et collaborateurs hétérogènes. L'approche exacte est applicable à des horizons de planification de court moyen terme. L'approche heuristique permet d'obtenir un rapport de charges globales, un plan de production au niveau des articles directeurs dans un horizon moyen long terme et un plan d'entrée pour l'ordonnancement. Toutefois, les objectifs du PDP sont nombreux et différents pour chaque entreprise. Plusieurs auteurs pourraient considérer des fonctions objectifs différentes de la nôtre.

À partir des modèles du processus PDP mature que nous avons proposé dans le troisième chapitre, nous avons indiqué les activités du PDP dans lesquelles le chef planificateur pourra exploiter l'approche d'optimisation heuristique. Nous avons ainsi établi un lien entre l'outil de support à la prise de décisions et le processus PDP.

Durant nos travaux de recherche, nous avons montré que l'intégration des technologies 4.0 permet de rendre agile le processus PDP des PME. Étant donné le caractère général de l'agilité il est important de spécifier ses dimensions. Le PDP 4.0 se caractérise par la flexibilité, la réactivité et l'innovation. En effet, les technologies 4.0 permettent de piloter les flux de production en temps réel et de vérifier la disponibilité des composants. Ainsi, lorsque des aléas de production ou d'approvisionnement apparaissent le PDP peut être recalculé. Ceci correspond à la réactivité. La simulation avec des approches d'optimisation rend plus flexible le PDP. Les plans du processus PDP 4.0 sont choisis en considérant plusieurs contraintes et scénarios de production. L'intégration de ces technologies propose par conséquent une nouvelle manière de faire les activités. Cela représente notre apport.

Ces dimensions de l'agilité ont été retrouvées à travers deux axes de transformation principaux, soient la surveillance et l'optimisation. Les systèmes cyberphysiques, l'internet des objets, l'infonuagique et la cybersécurité sont les technologies 4.0 qui portent sur la surveillance au processus PDP 4.0. Quant à l'optimisation, la simulation et l'intelligence artificielle (apprentissage automatique) sont les technologies privilégiées.

Même si la quatrième révolution industrielle repose sur un ensemble de technologies, leur sélection dépend des activités à améliorer et du niveau de capacité défini par l'entreprise. Le PDP est un processus complexe qui associe plusieurs acteurs et beaucoup d'activités de prise de décisions. Les technologies 4.0 constituent principalement un support pour les activités de capture des données et de prise des décisions. Nous pouvons ainsi penser que l'évolution des projets d'intégration des groupes technologiques 4.0 aux activités du PDP amènera les industriels à vouloir supprimer ce processus et avec pour objectif d'augmenter la portée des activités d'ordonnancement et de dimensionnement (PIC).

Le processus PDP 4.0 que nous avons proposé est adapté aux PME manufacturières avec une stratégie de production d'assemblage sur commande. Toutefois, il serait intéressant d'étudier si ce modèle est applicable dans d'autres contextes industriels. D'autre part, nous avons démontré que ce processus favorise l'agilité. Cependant, d'autres objectifs ont été associés aux projets de transformation numérique, tels que : la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité, l'amélioration de la qualité et la réduction des délais. Il serait pertinent en conséquence d'analyser si notre processus PDP 4.0 permet d'atteindre d'autres objectifs de performance.

Dans les projets de transformation numérique, l'identification du besoin et son alignement avec la stratégie de la PME sont fondamentaux pour la réussite du projet. Diverses techniques peuvent être déployées pour faire une analyse du besoin industriel. Toutefois, il est très important que la technique sélectionnée permette de récupérer des informations de toutes les parties prenantes du processus. Ceci rend possibles la capitalisation des connaissances et des expériences des employés et la proposition d'une solution pour l'ensemble des participants. La réussite d'un projet de transformation numérique dépend de la collaboration des employés. Le fait de les convoquer dans la conception de la solution permettra de les motiver et de les engager avec le déroulement du projet.

L'étude Delphi-Régnier a permis d'identifier le besoin de notre partenaire industriel au niveau du processus PDP. Il serait intéressant de faire une extension de cette étude dans un groupe représentatif des PME.

L'analyse du besoin de l'entreprise, la sélection des activités susceptibles d'être améliorées par les groupes technologiques 4.0, le choix des technologies et la définition de la portée du 4.0 sont les étapes de planification d'un projet de transformation numérique. Au cours de nos travaux de recherche, nous avons développé des activités associées à chacune de ces étapes. À partir des modèles du processus PDP 4.0, l'entreprise pourra faire le choix des technologies à déployer pour ensuite passer au déploiement de l'initiative et la mesure des gains. Des recherches futures pourraient s'intéresser à ces étapes.

Dans la recherche de solutions intermédiaires à la transformation numérique, les approches d'optimisation constituent une alternative à faible coût permettant de supporter la prise des décisions du PDP. L'approche d'optimisation heuristique que nous avons proposée permet d'obtenir des propositions en peu de temps et en considérant beaucoup de contraintes du système de production.

À l'ère de la quatrième révolution industrielle, ces outils continuent à avoir une place essentielle dans les activités de planification à moyen terme. Lors de la modélisation du PDP 4.0, nous avons couplé dans nombreuses activités la simulation avec les approches d'optimisation pour sélectionner le meilleur scénario en fonction des indicateurs de performance de ce processus. Il serait en conséquence intéressant de coupler l'approche d'optimisation heuristique que nous avons présentée avec un outil de simulation dans le but de permettre au chef planificateur d'analyser différents scénarios de production pour mieux supporter la prise de décisions.

Nos travaux de recherche se sont concentrés sur le processus PDP. Nous avons proposé la transformation de ce processus à travers l'intégration des technologies 4.0. Les recherches futures pourraient faire une extension vers les activités de planification à court terme, activité d'ordonnancement 4.0, et à moyen long-terme, plan industriel et commercial 4.0. À partir des transformations proposées sur ces processus, il serait intéressant de réévaluer le processus PDP 4.0 que nous avons proposé.



# Bibliographie

Alberts, D. S., et Hayes, R. E. 2003. *Power to the Edge: Command and Control in the Information Age*. Washington DC. CCRP Publication Series.

Akhoondi, F., Lotfi, M. M. 2016. "A heuristic algorithm for master production scheduling problem with controllable processing times and scenario-based demands", *International Journal of Production Research*. 54 (12): 3659-3676. doi: 10.1080/00207543.2015.1125032.

APICS, 2011. *Dictionary*. Chicago: APICS The Association of Operations Management.

Arnold, J. T., Chapman, S. N., Clive, L. M. 2008. "Introduction to materials Management". 6<sup>th</sup> edn. Pearson Prentice Hall. Edited by V. R. Anthony and E. Krassow. New Jersey. doi: 10.1017/mdh.2014.75.

Asadzadeh, L. 2015. "A local search genetic algorithm for the job shop scheduling problem with intelligent agents".85: 376-383. *Computers and Industrial Engineering*. doi: 10.1016/j.cie.2015.04.006.

Autenrieth, P. et al. 2018. "Current Significance of IT-Infrastructure enabling Industry 4.0 in Large Companies". In *IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. Stuttgart, 2018, pp. 1-8. doi: 10.1109/ICE.2018.8436244.

Baglin, G., Lamouri, S. & Thomas, A. 2015. "Maîtriser les Progiciels ERP". Première éd. Paris: ECONOMICA.

Bakar, M. R. A., Abbas, I. T., Kalaf, B. A. 2017. "Solution for multi-objective optimization master production scheduling problems based on swarm intelligence algorithms". *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*.14(11): 5184–5194. doi: 10.1166/jctn.2017.6729.

Berger, C. et al. 2019. "Approach for an event-driven production control for cyber-physical production systems". In *12<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Naples, 2018, pp. 349–354. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.085.

Biesinger, F. et al.2019. "A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin". In *12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Naples, 2018, pp. 355–360. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.087.

Caricato, P., Grieco, A. 2017. "An Application of Industry 4.0 to the Production of Packaging Films". In *27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM*, 2017, pp. 949–956. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.199.

CEFRIO. 2016. "Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'industrie 4.0 chez les PME". CEFRIO. Disponible en ligne sur: <https://cefrio.qc.ca/fr/realisations-et-publications/prendre-part-a-la-revolution-manufacturiere-industrie40/> [Consulté le 30 Octobre 2019].

- Chakraborty, R. K. et al. 2015. "A possibilistic environment based particle swarm optimization for aggregate production planning". *Computers & Industrial Engineering*. 88: 366–377. doi: 10.1016/j.cie.2015.07.021.
- Chen, Y. Y., Lin, J. T. 2008. "Hierarchical multi-constraint production planning problem using linear programming and heuristics". *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*. 25(5): 347–357. doi: 10.1080/10170660809509098.
- Chern, C., Yang, I. 2011. "A heuristic master planning algorithm for supply chains that consider substitutions and commonalities". *Expert Systems with Applications*. 38(12): 14918–14934. doi: 10.1016/j.eswa.2011.05.055.
- Dallasega, P. et al. 2017. "Simulation Based Validation of Supply Chain Effects through ICT enabled Real-time-capability in ETO Production Planning". In 27<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM, 2017, pp. 846–853. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.187.
- Danjou, C., Rivest, L., Pellerin, R. 2016. "Industrie 4.0: Les pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité". CEFRIO. Québec.
- Denno, P., Dickerson, C., Anne, J. 2018. "Dynamic production system identification for smart manufacturing systems". *Journal of Manufacturing Systems*. 48(C): 192–203. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.04.006.
- Díaz-Madroño, M., Mula, J., Peidro, D. 2014. "A review of discrete-time optimization models for tactical production planning". 52 (17): 5171- 5205. *International Journal of Production Research*. doi: 10.1080/00207543.2014.899721.
- Dörmer, J., Gujjula, R. 2013. "Master production scheduling and sequencing at mixed-model assembly lines in the automotive industry". *Flex Service Manufacturing Journal*. 27(1): 1–29. doi: 10.1007/s10696-013-9173-8.
- Engelhardt, P., Reinhart, G. 2012. "Approach for an RFID-based situational shop floor control". In IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong, 2012, pp. 444–448. doi: 10.1109/IEEM.2012.6837778.
- Englberger, J., Herrmann, F., Manitz, M. 2016. "Two-stage stochastic master production scheduling under demand uncertainty in a rolling planning environment". *International Journal of Production Research*. 54 (20): 6192- 6215. doi: 10.1080/00207543.2016.1162917.205
- Erol, S., Sihn, W. 2017. "Intelligent Production Planning and Control in the Cloud - Towards a Scalable Software Architecture". In 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in manufacturing Engineering. Ischia, 2017, pp. 571–576. doi: 10.1016/j.procir.2017.01.003.
- European Commission, 2008. "Think Small First- Priorité aux PME Un Small Acte pour l'Europe". Disponible en ligne sur : <http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/bibliotheque/consulter.php?id=2321> [Consulté le 16/10/2019].
- Fang, C. et al. 2016. "Optimal production planning in a hybrid manufacturing and recovering system based on the internet of things with closed loop supply chains". *Operational Research*. 16(3): 543–577. doi: 10.1007/s12351-015-0213-x.

- Feng, K., Rao, U. S., Raturi, A. 2011. "Setting planned orders in master production scheduling under demand uncertainty". *International Journal of Production Research*. 49(13): 4007–4025. doi: 10.1080/00207543.2010.495955.
- Gahm, C., Dünnwald, B., Sahamie, R. 2014. "A multi-criteria master production scheduling approach for special purpose machinery". *International Journal of Production Economics*. 149: 89–101. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.10.011.
- Geisberger, E. & Broy, M. 2012. "Agenda CPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems". Berlin: Springer.
- Genin, P. et al. 2014. "Multi-facilities tactical planning robustness with experimental design". *Production Planning and Control*. 19(2): 171–182. doi: 10.1080/09537280801896250.
- Georgiadis, P., Michaloudis, C. 2012. "Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis". *European Journal of Operational Research*. 216(1): 94–104. doi: 10.1016/j.ejor.2011.07.022.
- Golmohammadi, D., Mansouri, S. A. 2015. "Complexity and Workload Considerations in Product mix Decisions under the Theory of Constraints". *Naval Research Logistics*. 62 (5): 357-369. doi: 10.1002/nav.21632.
- Gordon, T., Hermer, O. (1964) "Report on a long-term range forecasting study". The Rand Corporation.
- Gourgand, M., Lemoine, D., Norre, S. 2010. "Metaheuristic for the capacitated lot-sizing problem: a software tool for MPS elaboration". *International Journal Mathematics in Operational Research*. 2(6): 724–747. doi: 10.1504/IJMOR.2010.035496.
- Gräbler, I., Pöhler, A. 2018. "Intelligent Devices in a Decentralized Production System Concept". In 11<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Naples, 2017, pp. 116–121. doi: 10.1016/j.procir.2017.12.186.
- Graessler, I., Poehler, A. 2017. "Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system". In IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Singapore, 2017, pp. 289–293. doi: 10.1109/IEEM.2017.8289898.
- Grundstein, S., Freitag, M., Scholz-Reiter, B. 2017. "A new method for autonomous control of complex job shops – Integrating order release, sequencing and capacity control to meet due dates". *Journal of Manufacturing Systems. The Society of Manufacturing Engineers*. 42: 11–28. doi: 10.1016/j.jmsy.2016.10.006.
- Guillaume, R., Thierry, C., Zieliński, P. 2017. "Robust material requirement planning with cumulative demand under uncertainty". *International Journal of Production Research*. 55 (22): 6824-6845. doi: 10.1080/00207543.2017.1353157.
- Helo, P., Phuong, D., Hao, Y. 2019. "Cloud manufacturing – Scheduling as a service for sheet metal manufacturing". *Computers and Operations Research*. 110: 208–219. doi: 10.1016/j.cor.2018.06.002.

- Hill, J. A. et al. 2000. "Master production scheduling in capacitated sequence-dependent process industries". *International Journal of Production Research*. 38(18): 4743–4761. doi: 10.1080/00207540050205613.
- Hill, J. A., Berry, W. L., Schilling, D. A. 2003. "Revising the master production schedule in sequence dependent processes". *International Journal of Production Research*. 41(9): 2021–2035. doi: 10.1080/0020754031000123886.
- Iannino, V. et al. 2018. "A Multi-Agent Approach for the Self-Optimization of Steel Production". *International Journal of Simulation, Systems, Science & Technology*. 19(5): 1–7. doi: 10.5013/IJSSST.a.19.05.20.
- Illmer, B., Vielhaber, M. 2018. "Virtual validation of decentrally controlled manufacturing systems with cyber-physical functionalities". In 51<sup>st</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems Virtual. Stockholm, 2018, pp. 509–514. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.195.
- Insee. 2019. "Les entreprises en France". Disponible en ligne sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4255717?sommaire=4256020> [Consulté le 12/06/2020].
- ISO. 2015. "La force économique des petites entreprises". Disponible en ligne sur: <https://www.iso.org/fr/news/2015/03/Ref1937.html> [Consulté le 12/06/2020].
- Jiang, Z. et al. 2017. "Distributed Dynamic Scheduling for Cyber-Physical Production Systems Based on a Multi-Agent System". *IEEE Acces*. 6(C):1855–1869. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2780321.
- Jonsson, P. Ivert, L. K. 2015. "Improving performance with sophisticated master production scheduling". *International Journal of Production Economics*. 168: 118–130. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.012.
- Kamper, A. et al. 2019. "Remanufacturing of electric vehicles: Challenges in production planning and control". In 16<sup>th</sup> Global Conference on Sustainable Manufacturing- Sustainable Manufacturing for Global Circular Economy. Lexington, 2019, pp. 280–287. doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.034.
- Keeney, S., Hasson, F., McKenna, H. P. 2001. "A critical review of the Delphi technique as a research methodology for nursing". *International Journal of Nursing Studies*. 38(2): 195–200. doi: 10.1016/S0020-7489(00)00044-4.
- Keung, K., Ip, W., Chan, C. 2001. "An enhanced MPS solution for FMS using GAs". *Integrated Manufacturing Systems*. 12(5): 351–359.
- Khaledi, H., Reisi-nafchi, M. 2013. "Dynamic production planning model: a dynamic programming approach". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 67: 1675–1681. doi: 10.1007/s00170-012-4600-7.
- Khanh, H. D., Kim, S. Y. 2015. "A Survey on Production Planning System in Construction Projects Based on Last Planner System". *Journal of Civil Engineering*. 20: 1-11. doi: 10.1007/s12205-015-1412-y.
- Klein, M. et al. 2018. "A negotiation based approach based production International for scheduling". In 28<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2018. Columbus, 2018, pp. 334–341. doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.054.

- Kohler, D., Weiz, J. 2016. "Industry 4.0: Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand". Industry. 176 éd. Paris: La Documentation française.
- Körpeolu, E., Yaman, H., Selim Aktürk, M. 2011. "A multi-stage stochastic programming approach in master production scheduling". *European Journal of Operational Research*, 213(1): 166–179. doi: 10.1016/j.ejor.2011.02.032.
- Kubo, R. H. et al. 2016. "Modeling of allocation control system of multifunctional resources for manufacturing systems". 12<sup>th</sup> IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON. Curitiba, 2016, PP: 1-8. doi: 10.1109/INDUSCON.2016.7874596.
- Kuhnle, A., Röhrig, N., Lanza, G. 2019. "Autonomous order dispatching in the semiconductor industry using reinforcement learning". 12<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Naples, 2019, pp. 391–396. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.101.
- Kumar, S. et al. 2018. "Investigating the value of integrated operations planning : A case-based approach from automotive industry". *International Journal of Production Research*.56 (22): 6971- 6992. doi: 10.1080/00207543.2018.1424367.
- Lachenmaier, J. F., Lasi, H., Kemper, H. G. 2017. "Simulation of Production Processes Involving Cyber-physical Systems". 10<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Ischia, 2017, pp. 577–582. doi: 10.1016/j.procir.2016.06.074.
- Lamouri, S. 1989. "Contribution méthodologique à la formalisation d'une stratégie de formation entrepreneurship (méthode Delphi combiné aux abaqués de Régnier) : proposition d'un plan de formation dans le cadre d'un centre d'entreprise et d'innovation". Thèse doctorale. INPL Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Land, M., Gaalman, G. J. 2009. "Production planning and control SMEs: time for change". *Internasjonal Politikk*. 20(7): 548–558. doi: 10.1080/09537280903034230.
- Lanza, G., Stricker, N., Moser, R. 2014. "Concept of an intelligent production control for global manufacturing in dynamic environments based on rescheduling". In IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Bangkok, 2013, pp. 315–319. doi: 10.1109/IEEM.2013.6962425.
- Lanza, G., Stricker, N., Peters, S. 2013. "Ad-hoc rescheduling and innovative business models for shock-robust production systems". In 46<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013. Setubal, 2013, pp. 121–126. doi: 10.1016/j.procir.2013.05.021.
- Leusin, M. E. et al. 2018. "Potential of a Multi-Agent System Approach for Production Control in Smart Factories". *IFAC papers online*. 51 (11): pp. 1459–1464. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.309.
- Li, Q. et al. 2017. "A data based production planning method for multi-variety and small-batch production". In IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Big Data Analysis, ICBDA 2017. Beijing, 2017, pp. 420–425. doi: 10.1109/ICBDA.2017.8078854.
- Li, X., He, D. 2013. "Dynamic master production scheduling for automobile mixed-mode assembly line based on the rates of payment and profit". In Proceedings - 2013 International Conference on Computational and Information Sciences, ICCIS 2013. Shiyang, 2013, pp. 1186–1189. doi: 10.1109/ICCIS.2013.314.

- Lin, P. et al. 2018. "Synchronization for smart factory - towards IoT-enabled mechanisms". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 31(7): 624–635. doi: 10.1080/0951192X.2017.1407445.
- Loo, R. 2002. "The Delphi method: a powerful tool for strategic management". *International Journal of Police Strategies and Management*. 25(4): 762–769.
- Mady, M. T. 2000. "Sales forecasting practices of Egyptian public enterprises: Survey evidence". *International Journal of Forecasting*. 16(3), 359–368. doi: 10.1016/S0169-2070(00)00033-9.
- Maleki, K. 2009. "Méthodes quantitatives de consultations d'experts".
- Martín, A. G., Díaz-Madroñero, M., Mula, J. 2020. "Master production schedule using robust optimization approaches in an automobile second-tier supplier". *Central European Journal of Operations Research*. 28(1), 143–166. doi: 10.1007/s10100-019-00607-2
- Meyer, G. G., Hans Wortmann, J. C., Szirbik, N. B. 2011. "Production monitoring and control with intelligent products". *International Journal of Production Research*. 49(5): 1303–1317. doi: 10.1080/00207543.2010.518742.
- Moeuf, A. et al. 2018. "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0". *International Journal of Production Research*. 56(3):1118–1136. doi: 10.1080/00207543.2017.1372647.
- Moeuf, A. et al., 2019. "Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs". *International Journal of Production Research*, 58(5), p. 1384-1400. doi: 10.1080/00207543.2019.1636323
- Mourtzis, D., Vlachou, E. 2018. "A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance". *Journal of Manufacturing Systems*. 47: 179–198. doi: 10.1016/j.jmsy.2018.05.008.
- Nedaei, H., Mahlooji, H. 2014. "Joint multi-objective master production scheduling and rolling horizon policy analysis in make-to-order supply chains". *International Journal of Production Research*. 52(9): 2767–2787. doi: 10.1080/00207543.2014.884732.
- Nonaka, Y. et al. 2015. "The S-Model: a Digital Manufacturing System combined with Autonomous Statistical Analysis and Autonomous Discrete-event Simulation for Smart Manufacturing". *International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2015*. Gothenburg, 2015, pp. 1006–1011. doi: 10.1109/CoASE.2015.7294230.
- Pellerin, R. 2018. "The contribution of Industry 4.0 in creating agility within SMEs". In *Proceedings of the 2018 IRMBAM Conference*. Nice, 2018, pp. 1–10.
- Perrot, A., Villemus, P., 2015. *La boîte à outils de la Supply Chain*. 1<sup>st</sup> ed, pp. 94-95 . Paris: Dunod.
- Porter, M. E. & Heppelmann, J. E., 2014. *Harvard Business Review*. Disponible en ligne sur : <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>
- Proud, J. F., 1999. *Master Scheduling: a practical guide to competitive manufacturing*. 2nd ed. New York, United States : John Wiley & Sons, Inc

- Pyke, D., Robb, D., Farley, J. 2000. "Manufacturing and Supply Chain Management in China: A Survey of State-, Collective-, and Privately-owned Enterprise". *European Management Journal*. 18(6): 577–589. doi: 10.1016/S0263-2373(00)00051-7.
- Qu, S. et al. 2016. "Optimized Adaptive Scheduling of a Manufacturing Process System with Multi-Skill Workforce and Multiple Machine Types: An Ontology-Based, Multi-Agent Reinforcement Learning Approach". In 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP-CMS. Stuttgart, 2016, pp. 55–60. doi: 10.1016/j.procir.2016.11.011.
- Raymond, L. 2005. "Operations management and advanced manufacturing technologies in SMEs". *Journal of Manufacturing Technology Management*. 16(8): 936-955
- Rajabinasab, A., Mansour, S. 2011. "Dynamic flexible job shop scheduling with alternative process plans: An agent-based approach". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 54(9–12): 1091–1107. doi: 10.1007/s00170-010-2986-7.
- Regnier, F. 1978. "Une approche endoscopique du travail de groupe: l'Abaque de Régnier".
- Rossit, D. A., Tohmé, F., Frutos, M. 2019. "Industry 4.0: Smart Scheduling". *International Journal of Production Research*. 57(12): 3802–3813. doi: 10.1080/00207543.2018.1504248.
- Ruessmann, M. et al. 2015. "Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries". Disponible en ligne sur: [https://www.bcg.com/fr-fr/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/fr-fr/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx) [Consulté le 16/10/2019].
- Ruppert, T., Abonyi, J. 2018. "Industrial internet of things based cycle time control of assembly lines". In IEEE International Conference on Future IoT Technologies, Future IoT. Eger, 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/FIOT.2018.8325590.
- Sadiq, S. S., Abdulazeez, A. M., Haron, H. 2020. "Solving multi-objective master production schedule problem using memetic algorithm". *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 18(2): 938–945. doi: 10.11591/ijeecs.v18.i2.pp938-945.
- Saif, U. et al. 2019. "Drum buffer rope-based heuristic for multi-level rolling horizon planning in mixed model production". *International Journal of Production Research*. 57(12): 3864–3891. doi: 10.1080/00207543.2019.1569272.
- Sajja, R. et al. 2018. "Evolutionary Optimization in Master Production Scheduling: A case study". *Advances in Intelligent systems and Computing*. 949: 371–379.
- Sawik, T. 2007. "Multi-objective master production scheduling in make-to-order manufacturing". *International Journal of production Research*. 45(12): 2629–2653. doi: 10.1080/00207540600847152.
- Shamsuzzoha, A. et al. 2016. "ICT-based solution approach for collaborative delivery of customized products". *Production Planning and Control*. 27(4): 280–298. doi: 10.1080/09537287.2015.1123322.

- Shim, S., Park, K., Choi, S. 2018. "Sustainable Production Scheduling in Open Innovation Perspective under the Fourth Industrial Revolution". *Journal of Open Innovation*. 4(42): 1-5. doi: 10.3390/joitmc4040042.
- Shpilevoy, V. et al. 2013. "Multi-agent system "Smart Factory" for real-time workshop management in aircraft jet engines production". 11<sup>th</sup> IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems. São Paulo, 2013, pp. 204–209. doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00025.
- Soares, M. M., Vieira, G. E. 2009. "A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems based on genetic algorithm". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 41: 549–567. doi: 10.1007/s00170-008-1481-x.
- Sousa, R. A. et al. 2018. "Job shop schedules analysis in the context of industry 4.0". In International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation ICE/ITMC.Funchal,2017,pp.711–717.doi: 10.1109/ICE.2017.8279955.
- Tang, L. et al. 2017. "Online and offline based load balance algorithm in cloud computing". *Knowledge-Based Systems*. 138: 91–104. doi: 10.1016/j.knosys.2017.09.040.
- Tang, O., Grubbström, R. W. 2002. "Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty". *International Journal of Production Economics*. 78: 323–334.
- Tobón Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin, R., Dubois, P., Moeuf, A. 2018. "The integration of ERP and inter-intra organizational information systems: A Literature Review". In 16<sup>th</sup> IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM. Bergamo,2018, pp. 1212–1217. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.425.
- Tobón Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin R., Forget, P., Moeuf, A. 2019a. "Planification de la production et Industrie 4.0: Revue de la littérature". In 13<sup>e</sup> conférence CIGI-Qualita. Montréal, 2019.
- Tobón Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin, R., Dubois, P., Moeuf, A. 2019b. "Production planning in the fourth industrial revolution: A literature review". In 9<sup>th</sup> IFAC conference on Manufacturing Modeling, Management and Control MIM 2019. Berlin, 2019, pp. 2158–2163. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.525.
- Tobón Valencia, E., Moussavi, S-E, Lamouri, S., Pellerin, R., Moeuf, A. 2019c. "An optimization approach for MPS in a MTO multiproduct assembly line system". In IEEE Proceedings of the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2019. Shanghai. doi: 10.1109/IESM45758.2019.8948090.
- Tomotani, J. V., Mesquita, M. A. 2017. "Lot sizing and scheduling : a survey of practices in Brazilian companies Lot sizing and scheduling : a survey of practices in Brazilian companies". *Production Planning & Control*. 29 (3): 236-246. doi: 10.1080/09537287.2017.1409370.
- Ueno, N. et al. 2012. "A two stage solution procedure for production planning system with advance demand information". *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*. 6(5): 633–646. doi: 10.1299/jamdsm.6.633.

- Um, J., Choi, Y. C., Stroud, I. 2014. "Factory planning system considering energy-Efficient process under cloud manufacturing". In 47<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems. Windsor, 2014, pp. 553–558. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.084.
- Van Den Broecke, F., Van Landeghem, H., Aghezzaf, E. H. 2005. "An application of cyclical master production scheduling in a multi-stage, multi-product environment". *Production Planning and Control*. 16(8): 796–809. doi: 10.1080/09537280500181061.
- Vanhoucke, M., Debels, D. 2014. "A finite-capacity production scheduling procedure for a Belgian steel company". *International Journal of Production Research*. 47(3): 561–584. doi: 10.1080/00207540701441970.
- Vargas, V., Metters, R. 2011. "A master production scheduling procedure for stochastic demand and rolling planning horizons". *International Journal of Production Economics*. 132(2): 296–302. doi: 10.1016/j.ijpe.2011.04.025.
- Vieira, G. E., Favaretto, F. 2006. "A new and practical heuristic for Master Production Scheduling creation". *International Journal of Production Research*. 44(18): 3607–3625. doi: 10.1080/00207540600818187.
- Vieira, G. E., Ribas, P. C. 2004. "A new multi-objective optimization method for master production scheduling problems using simulated annealing". *International Journal of Production Research*. 42(21): 4609–4622. doi: 10.1080/00207540410001733869.
- Vollmann, T. E., Berry, W. L. & Whybark, D. C. 1992. "Manufacturing Planning and Control Systems". 3<sup>rd</sup> éd. The IRWIN/APICS series in Production Management.
- Wandt, R., Friedewald, A., Lödding, H. 2012. "Simulation aided disturbance management in one-of-a-kind production on the assembly site". IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Hong Kong, 2012, pp. 503–507. doi: 10.1109/IEEM.2012.6837790.
- Wang, B. et al. 2017. "Simultaneous order scheduling and mixed-model sequencing in assemble-to-order production environment: a multi-objective hybrid artificial bee colony algorithm". *Journal of Intelligent Manufacturing*. 28: 419–436. doi: 10.1007/s10845-014-0988-2.
- Wang, L. et al. 2012. "Pheromone-based coordination for manufacturing system control". *Journal of Intelligent Manufacturing*. 23(3): 747–757. doi: 10.1007/s10845-010-0426-z.
- Wang, X. et al. 2019. "Enhancing smart shop floor management with ubiquitous augmented reality". *International Journal of Production Research*. 58 (8): 2352- 2367. doi: 10.1080/00207543.2019.1629667.
- Waschneck, B. et al. 2018. "Optimization of global production scheduling deep reinforcement learning". In 51<sup>st</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems. Stockholm, 2018, pp. 1264–1269. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.212.
- Wermus, M. 2001. "A survey on shop floor control techniques in Polish make-to-order companies". *International Journal of Operations and Production Management*. 21(11): 1452–1459. doi: 10.1108/01443570110407445.

- White, S. A. (2004) Introduction to BPMN, IBM Cooperation. doi: 10.3727/000000006783982421.
- Windle, P. E. 2004. "Delphi technique: Assessing component needs". *Journal of Perianesthesia Nursing*. 19(1): 46–47. doi: 10.1016/j.jopan.2003.11.005.
- Wong, W. K., Chan, C. K., Ip, W. H. 2001. "A hybrid flow shop scheduling model for apparel manufacture". *International Journal of Clothing Science and Technology*. 13(2): 115–131. doi: 10.1108/09556220110390737.
- Wu, Y., Liu, M. and Wu, C. 2002. "A genetic algorithm for optimizing the MPSOF a processing-assembly production line with identical machines". In Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Beijing, 2002, pp. 1172–1177. doi: 10.1109/ICMLC.2002.1167385.
- Wu, Z. J. et al. 2010. "Research on double objective optimization of master production schedule based on ant colony algorithm". Proceedings - 2010 International Conference on Computational Intelligence and Security, CIS 2010. Nanning, 2010, pp. 200–204. doi: 10.1109/CIS.2010.49.
- Wu, Z., Zhang, C., Zhu, X. 2012. "An ant colony algorithm for Master production scheduling optimization". In 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Wuhan, 2012, pp. 775–779. doi: 10.1109/CSCWD.2012.6221908.
- Xu, Y., Chen, M. 2016. "Improving Just-in-Time Manufacturing Operations by Using Internet of Things Based Solutions". In 9<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology. Nanjing, 2016, pp. 326–331. doi: 10.1016/j.procir.2016.10.030.
- Xu, Y., Chen, M. 2017. "An Internet of Things based framework to enhance just-in-time manufacturing". *Journal of Engineering Manufacture*. 232(13): 2353–263. doi: 10.1177/0954405417731467.
- Yi, W., Min, L., Wu, C. 2002. "A genetic algorithm for optimizing the MPS of a processing-assembly production line with identical machines". First International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Beijing, 2002, pp. 4–5. doi: 10.1109/ICMLC.2002.1167385.
- Yuan, Q. H., Wang, W., Dong, X. F. 2010. "Simulation and optimization of carbon enterprises master production scheduling based on genetic algorithm". In International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, CCIE 2010. Wuhan, 2010, pp. 208–211. doi: 10.1109/CCIE.2010.61.
- Zaidan, A. A. et al. 2019. "A new hybrid algorithm of simulated annealing and simplex downhill for solving multiple-objective aggregate production planning on fuzzy environment". *Neural Computing and Applications*. 31(6): 1823–1834. doi: 10.1007/s00521-017-3159-5.
- Zheng-jia, W. et al. 2010. "Research on Double Objective Optimization of Master Production Schedule Based on Ant Colony Algorithm". In International Conference on Computational Intelligence and Security. Nanning, 2010, pp. 1–5. doi: 10.1109/CIS.2010.49.
- Zhou, G. et al. 2019. "Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing". *International Journal of Production Research*. doi: 10.1080/00207543.2019.1607978.

Zhu, X., Qiao, F., Cao, Q. 2017. "Industrial big data – based scheduling modeling framework for complex manufacturing system". *Advances in Mechanical Engineering*. 9(8):1–12. doi: 10.1177/1687814017726289.

Zobolas, G. I., Tarantilis, C. D., Ioannou, G. 2008. "Extending capacity planning by positive lead times and optional overtime, earliness and tardiness for effective master production scheduling". *International Journal of Production Research*. 46(12): 3359–3386. doi: 10.1080/00207540601008374

# Annexes

# Annexe 1 Questionnaire Premier Tour

## Caractéristiques du processus PDP

ITEM 1 : Les données sur la charge et la capacité extraites des décisions du PIC sont très utilisées dans le processus du PDP.

ITEM 2 : Les données sur les en-cours sont très utilisées dans le processus/ le planning du PDP.

ITEM 3 : Les prévisions de la demande sont des données d'entrée essentielles du PDP.

ITEM 4 : Les commandes clients sont une donnée d'entrée essentielle du PDP.

ITEM 5 : La détermination de la disponibilité des matières premières est un élément essentiel du processus de planification du PDP.

ITEM 6 : Les macros gammes et les macros nomenclatures de production sont des données d'entrée importantes du processus de planification du PDP.

ITEM 7 : Les décisions prises lors des réunions PDP sont des données essentielles pour l'élaboration du planning final du PDP.

ITEM 8 : Les données pour la préparation des réunions PDP sont principalement récupérées à l'aide d'un outil informatique (Excel).

ITEM 9 : Les données pour la préparation des réunions du PDP sont principalement extraites d'un système ERP (Sage X3).

ITEM 10 : Les processus de prise de décision du PDP sont actuellement soutenus par un ERP (Sage X3).

ITEM 11 : Les processus de prise de décision du PDP sont actuellement soutenus par un outil d'informatique (Excel).

ITEM 12 : Le PDP fournit une base pour le planning proposé par le responsable de l'ordonnancement.

ITEM 13 : Le PDP établit une base importante pour l'activité d'approvisionnement.

ITEM 14 : Le lancement des ordres de fabrication respecte le PDP.

ITEM 15 : Les responsables commerciaux communiquent le retard aux clients sur la base du PDP.

ITEM 16 : Les propositions du PDP sont alignées avec le PIC.

ITEM 17 : Les informations concernant les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à disposition via un outil de support informatique (Excel).

ITEM 18 : Les informations concernant les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à disposition par le biais de l'ERP (Sage X3).

ITEM 20 : Le planning proposé par le PDP résulte flexible vis-à-vis de l'absentéisme.

ITEM 21 : Le planning proposé par le PDP est flexible vis-à-vis des matières premières manquantes ères.

ITEM 22 : Le planning proposé par le PDP est adaptable face aux changements des délais de livraison des commandes des clients.

ITEM 23 : Le planning proposé par le PDP est adaptable face à l'annulation d'une commande client.

ITEM 24 : La différence entre les commandes acceptées et les commandes exécutées a été réduite par le PDP.

ITEM 25 : La production suit le planning du PDP sans changement.

ITEM 26 : Le PDP a optimisé l'utilisation des ressources impliquées dans le processus de planification de la production.

ITEM 27 : Le PDP actuel a eu une incidence positive sur le taux de service aux clients.

ITEM 28 : Le PDP actuel a eu une incidence positive sur le taux de rotation des stocks.

ITEM 29 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement fournit une base pour l'activité d'approvisionnement/le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour l'activité du responsable ordonnancement.

ITEM 30 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement sert de base à l'activité du responsable de production/Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour l'activité du responsable de production.

ITEM 31 : Il existe un environnement de coopération efficace et actif entre les départements des ventes, de la production et supply chain.

ITEM 32 : Les participants aux réunions PDP défendent fréquemment des objectifs différents comme la diminution des coûts, l'optimisation des capacités, la maximisation du taux de service.

ITEM 33 : L'objectif du PDP est clairement défini.

ITEM 34 : Les données d'entrée requises pour le processus PDP sont clairement identifiées.

ITEM 35 : Le processus PDP implique des personnes de différents départements (ventes, production, approvisionnement, ordonnancement, planificateur principal, directeur de la qualité).

ITEM 36 : Le processus PDP est clairement défini dans l'entreprise.

ITEM 37 : La préparation des réunions PDP est un procès clairement défini de l'entreprise.

ITEM 38: Le PDP se déroule dans le cadre de réunions consécutives dont les objectifs sont clairement énoncés.

ITEM 39: Le déroulement des réunions PDP est un procès clairement défini de l'entreprise.

ITEM 40: L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée à tous les participants.

ITEM 41: Il existe un processus de communication clair entre les participants du PDP.

ITEM 42 : Les outils informatiques et les systèmes d'information disponibles constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.

ITEM 43 : Les outils informatiques et les systèmes d'information qui sont utilisés dans le processus PDP sont intégrés. L'intégration concerne le partage des données, des processus opérationnels et des sources de données à l'intérieur d'une entreprise ou entre l'entreprise et ses partenaires.

## Prise de décisions PDP

ITEM 1 : La disponibilité des matières premières a une influence sur les décisions relatives au processus PDP.

ITEM 2 : Les outils exploités dans les processus PDP présentent un haut niveau d'automatisation.

ITEM 3 : La stabilité de la production a une forte influence sur les décisions du PDP.

ITEM 4 : L'utilisation des ressources a une forte influence sur les décisions du PDP.

ITEM 5 : Le niveau de service a une forte influence sur les décisions du PDP.

ITEM 6 : Le niveau du stock a une forte influence sur les décisions du PPD.

ITEM 7 : Les décisions prises lors des réunions du PDP sont fréquemment mises à jour.

## Caractéristiques du marché

ITEM 1 : La pression exercée par les clients sur les délais de livraison est très forte.

ITEM 2 : La demande est fortement caractérisée par l'incertitude.

ITEM 3 : La demande est caractérisée par de grandes variations.

## Retard Commandes clients

ITEM 1 : Le retard de fournisseurs a une forte influence sur le retard de commandes des clients.

ITEM 2 : Les problèmes de dimensionnement de la capacité des ressources ont une forte influence sur le retard de commandes des clients.

ITEM 3 : Le manque de visibilité de la charge a une forte influence sur le retard de commandes des clients.

ITEM 4 : La sous-estimation des temps de conception et d'industrialisation a une forte influence sur le retard de commandes des clients.

ITEM 5 : L'écart entre les retours d'information en temps réel de l'atelier et le processus de planification a une forte influence sur le retard de commandes des clients.

## Annexe 2 Synthèse Premier Tour

Le premier tour de cette étude Delphi avait comme objectif de caractériser le processus du PDP dans un environnement de PME. Ainsi différents interlocuteurs impliqués dans ce processus se sont exprimés sur un ensemble d'affirmations au tour de quatre thématiques suivantes : caractéristiques du processus PDP, prise de décisions PDP, caractéristiques du marché, retard de commandes clients, difficultés et point d'amélioration PDP.

Nous présentons par la suite de ce document une synthèse des idées récupérées du premier tour. Postérieurement, les opinions des participants au questionnaire au niveau de détail de l'item sont présentées.

Pour l'analyse des résultats, nous avons considéré les consensus à partir de 80 % d'avis favorables ou défavorables. Les autres résultats ont été considérés comme une absence de consensus.

### Caractéristiques du processus PDP

Les interlocuteurs remarquent l'importance des données d'entrée suivantes pour le processus de planification du PDP : commandes clients, disponibilité de matières premières (items 4 et 5). Ils sont majoritairement d'accord sur l'utilisation des décisions prises lors des réunions PDP dans l'élaboration du plan final (item 7). Cependant, les participants sont mitigés sur l'utilisation actuelle des données suivantes : charge et capacité du PIC, des en-cours, des prévisions de la demande et de macro-gammes et macro-nomenclatures dans le processus PDP (items 1,2, 3 et 6). Ceci peut être expliqué par un avis mitigé sur l'identification claire des données d'entrée requises par le processus PDP (item 12-thématique difficultés et opportunités d'amélioration).

Les interlocuteurs remarquent l'importance des données d'entrée suivantes pour le processus de planification du PDP : commandes clients, disponibilité de matières premières (items 4 et 5). Ils sont majoritairement d'accord sur l'utilisation des décisions prises lors des réunions PDP dans l'élaboration du plan final (item 7). Cependant, les participants sont mitigés sur

l'utilisation actuelle des données suivantes : charge et capacité du PIC, des en-cours, des prévisions de la demande et de macro-gammes et macro-nomenclatures dans le processus PDP (items 1,2, 3 et 6). Ceci peut être expliqué par un avis mitigé sur l'identification claire des données d'entrée requises par le processus PDP (item 12-thématique difficultés et opportunités d'amélioration).

Ces données sont récupérées à l'aide d'un outil informatique de type (Excel) (item 8). Cet outil est également exploité pour le partage des informations concernant les décisions prises lors de réunions PDP (item 17). Le système ERP (Sage X3) n'est pas considéré par tous les interlocuteurs comme l'outil fondamental pour extraire les données, non plus pour le partage des directives du PDP (item 9 et 18). Il est donc possible de classer le processus actuel du PDP dans un niveau artisanal dans l'échelle proposée par le CEFRIO en 2016<sup>6</sup>.

Les processus de prise de décision du PDP sont principalement soutenus par un outil de type Excel (items 10 et 11).

Les interlocuteurs considèrent le PDP comme un élément fondamental pour le planning proposé par l'ordonnanceur et l'approvisionneur (items 12 et 13). Ils sont majoritairement d'accord sur le fait de communiquer le retard aux clients sur la base du PDP (item15). Cependant, les interlocuteurs sont mitigés sur l'utilisation du PDP pour le lancement des ordres de fabrication (items 14 et 25).

Le planning proposé par le PDP n'est pas considéré comme adaptable et non plus flexible d'après les interlocuteurs (items 19,20, 21, 22, 23). Les Chefs Planificateurs, ont peu de marge de manœuvre face aux pannes de machines, l'absentéisme de collaborateurs, l'indisponibilité des matières premières, les changements des délais de livraison de la part des clients et l'annulation des commandes.

Les interlocuteurs sont mitigés sur les résultats du PDP au niveau d'optimisation d'utilisation des ressources, taux de service aux clients et taux de rotation de stock (items 26,27 et 28). Ils sont mitigés sur l'alignement de propositions du PDP avec le PIC (item 16).

---

<sup>6</sup> CEFRIO. 2016. "Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'industrie 4.0 chez les PME". CEFRIO. Disponible en ligne sur: <https://cefrio.qc.ca/fr/realisations-et-publications/prendre-part-a-la-revolution-manufacturiere-industrie40/> [Consulté le 30 Octobre 2019].

Les interlocuteurs considèrent que le PDP se déroule dans le cadre des réunions consécutives dont les objectifs sont clairement énoncés (item 38). Cependant, ils ne considèrent pas que dans l'ensemble le processus PDP soit clairement défini (item 36). À ce propos ils considèrent que la préparation et le déroulement des réunions ne sont pas des processus clairement définis (items 37 et 39).

Les interlocuteurs sont mitigés sur la clarté de la définition de l'objectif du PDP (item 33). Il n'est pas non plus clair si les participants aux réunions PDP défendent des objectifs différents tels que la diminution des coûts, l'optimisation des capacités et la maximisation du taux de service (item 32).

Les interlocuteurs précisent que le processus PDP implique des personnes de différents départements (item 35). Ils précisent qu'il existe un environnement de coopération efficace et active entre ces départements (item 31). Ils sont majoritairement d'accord sur l'intégration et le transfert des informations sur les décisions prises lors des réunions du PDP (item 40). Ils sont pourtant mitigés sur l'existence d'un processus de communication clair entre les participants du PDP (item 41).

La majorité des interlocuteurs considèrent que les outils et les systèmes sont bien intégrés (item 43).

## Prise de décisions PDP

La disponibilité des matières premières et l'utilisation des ressources ont une influence considérable sur les décisions du processus PDP d'après les interlocuteurs (Item 1 et 4). Ils sont majoritairement d'accord sur le fait que la stabilité de la production ait une influence sur les décisions PDP. Néanmoins, l'influence du niveau de service et du niveau de stock sur les décisions du PDP n'est pas claire pour les interlocuteurs.

Cependant, les interlocuteurs considèrent que ces outils ne sont pas automatisés (item 2).

L'absence des objectifs du PDP pourrait expliquer la mise à jour fréquente des décisions prises lors des réunions PDP (item 5).

Cependant, les interlocuteurs considèrent que ces outils ne sont pas automatisés (item 2).

## Caractéristiques du marché

Les participants considèrent que la pression exercée par les clients, sur les délais de livraison, est très forte (item1).

Les interlocuteurs sont majoritairement d'accord sur une demande caractérisée par de grandes variations (item 3). Il reste à préciser dans un autre tour si ces variations concernent l'horizon du PDP. En ce qui concerne l'incertitude de la demande, les avis des interlocuteurs sont très divers (item 2). En conséquence, il n'est pas possible d'attirer une conclusion à ce sujet.

## Retard Commandes clients

Les interlocuteurs considèrent que les problèmes de dimensionnement de la capacité ont une forte influence sur le retard de commandes des clients (item 2). Ils considèrent majoritairement que le retard de fournisseurs, la sous-estimation des temps de conception et d'industrialisation, et l'écart entre le processus en temps réel à l'atelier et la planification sont d'autres causes du retard (items 1,4 et 5). Les dernières causes soulèvent un manque de précision de la structure du délai pour la détermination du délai contractuel.

Il n'est pas clair pour l'ensemble des interlocuteurs si la visibilité de la charge est correcte ou pas et en conséquence si cela a un impact sur le retard de commandes des clients (item3).

## Commentaires Item par Item

Les résultats sont présentés dans les cinq thématiques d'étude suivantes : caractéristiques du processus PDP, prise des décisions PDP, Caractéristiques du marché, retard commandes clients et difficultés et opportunités d'amélioration. Nous présentons les items par ordre de consensus favorable décroissant.

## Thématique- Caractéristiques du processus PDP

ITEM 4 : Les commandes clients sont une donnée d'entrée essentielle du PDP

100% d'avis favorables

La totalité des participants considère les commandes clients comme une donnée d'entrée essentielle du PDP.

ITEM 38: Le PDP se déroule dans le cadre de réunions consécutives dont les objectifs sont clairement énoncés

100 % d'avis favorables

L'ensemble des participants s'est montré favorable vis-à-vis de la fréquence des réunions et la clarté des objectifs. Néanmoins, certains participants considèrent que les objectifs du PDP pourraient être mieux détaillés.

ITEM 12 : Le PDP fournit une base pour le planning proposé par le responsable de l'ordonnancement

88% d'avis favorables et 12% d'avis mitigés

La majorité des participants considèrent sur la théorie que le PDP fournit une base pour le planning proposé par le responsable de l'ordonnancement. Les avis mitigés considèrent que sur la pratique ceci n'est pas vrai.

ITEM 13 : Le PDP établit une base importante pour l'activité d'approvisionnement

88 % d'avis favorables et 12 % d'avis mitigés

La majorité des participants est d'accord avec le principe. Cependant, ils considèrent la mise à jour des dates des ordres de fabrication et des commandes sont essentielles pour générer les besoins au temps.

ITEM 17 : Les informations concernant les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à disposition via un outil de support informatique (Excel)

85 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés et 8 % ne savent pas

Les participants précisent qu'Excel constitue l'outil principal pour la récupération des données (via MyReport, outil lié à l'ERP) ainsi que pour l'exploitation (prédiction) et la mise à jour (adaptation) des informations du PDP. Les participants avec un avis mitigé précisent que les informations sont mises à disposition par un fichier Excel à travers le réseau local, mais il n'est pas à jour et l'accès n'est pas simple.

ITEM 31 : Il existe un environnement de coopération efficace et actif entre les départements des ventes, de la production et supply chain

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

Les avis majoritairement favorables par rapport cette affirmation montre qu'il existe une coopération efficace entre les départements de ventes, production et Supply Chain. Certains participants précisent que cette collaboration est plus réactive entre la production et l'équipe Supply Chain

ITEM 8 : Les données pour la préparation des réunions PDP sont principalement récupérées à l'aide d'un outil informatique (Excel)

83 % d'avis favorables et 17 % ne savent pas

La majorité des participants indiquent que l'outil de travail fondamental pour la préparation des réunions PDP est Excel.

ITEM 35 : Le processus PDP implique des personnes de différents départements (ventes, production, approvisionnement, ordonnancement, planificateur principal, directeur de la qualité)

82 % d'avis favorables et 18 % ne savent pas

Les participants se sont montrés favorables par rapport la participation des personnes des différents départements dans le processus PDP. Cependant, certains participants précisent qu'en pratique le groupe des participants est inférieur est souvent réduit au Chef Planificateur et un deuxième interlocuteur.

ITEM 5 : La détermination de la disponibilité des matières premières est un élément essentiel du processus de planification du PDP

83 % d'avis favorables et 17 % d'avis défavorables

La majorité des participants considèrent la disponibilité de matières premières comme élément essentiel du processus PDP. Certains participants indiquent que la vérification de cette disponibilité manque d'automatisation. Dans les bonnes pratiques de planification de la production, l'estimation du plus long délai cumulé assure la disponibilité de tous les matières

et composants avant de démarrer la production. Ceci peut justifier l'avis défavorable à cette affirmation.

ITEM 2 : Les données sur les en-cours sont très utilisées dans le processus/ le planning du PDP

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

La majorité des participants considèrent que les données sur les en-cours sont très utilisées dans le processus PDP.

ITEM 7 : Les décisions prises lors des réunions PDP sont des données essentielles pour l'élaboration du planning final du PDP

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

La majorité des participants considèrent que les décisions prises lors des réunions PDP sont des données essentielles pour l'élaboration du planning final.

ITEM 11 : Les processus de prise de décision du PDP sont actuellement soutenus par un outil d'informatique (Excel)

75 % d'avis favorables et 25 % ne savent pas

Excel semble être l'outil principal de support à la prise de décisions du PDP.

ITEM 15 : Les responsables commerciaux communiquent le retard aux clients sur la base du PDP

75 % d'avis favorables et 25 % d'avis défavorables

La différence entre les avis des participants par rapport cette affirmation dépend du site de fabrication. Pour l'un des sites de production, les participants disent que le PDP est un outil qui permet d'avoir une visibilité sur la charge, le plan d'approvisionnement et d'ingénierie, ce qui permet de communiquer et d'anticiper le retard. Dans le cas contraire, l'information du PDP n'est pas mise à disposition du service commercial.

ITEM 30 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement sert de base à l'activité du responsable de production/Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour l'activité du responsable de production

67 % d'avis favorables et 33 % mitigés

Les plans d'ordonnancement et d'approvisionnement mis à jour servent de base à l'activité de production.

ITEM 6 : Les macros gammes et les macros nomenclatures de production sont des données d'entrée importantes du processus de planification du PDP

67 % d'avis favorables, 16 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Les participants avec un avis favorable pour cette affirmation précisent que le processus PDP est actuellement fondé sur les temps de gamme. Les personnes avec un avis défavorable par rapport cette affirmation précisent que les macro-gammes sont inexistantes pour la plupart de cas et peu fiables en cas d'existence. Les personnes avec un avis mitigé précisent que l'utilisation de macro nomenclatures est pertinente dans certains cas.

ITEM 40: L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée à tous les participants

67 % d'avis favorables, 16 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Même si la plupart des participants sont exprimés un avis favorable par rapport cette affirmation, certains indiquent que les plans d'action sont partagés, mais il n'y a pas de comptes rendus.

ITEM 42 : Les outils informatiques et les systèmes d'information disponibles constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP

67 % d'avis favorables et 33 % d'avis défavorables

La plus grande partie des participants considèrent que les outils informatiques et les systèmes d'information disponibles constituent une bonne base pour soutenir les processus décisionnels du PDP. Cependant, certains utilisateurs remarquent de problématiques liées à la spécificité des nomenclatures et gammes. D'autres indiquent que les outils actuellement disponibles ne permettent pas de visualiser la charge-capacité. Ils considèrent également que ces outils ne permettent pas d'estimer le délai critique ou le plus long délai d'approvisionnement.

ITEM 33 : L'objectif du PDP est clairement défini

50 % d'avis favorables et 50 % mitigés

Parmi le groupe certains considèrent que les objectifs peuvent être mieux formalisés et détaillés. À partir de réponses recueillies, il est possible d'identifier que l'optimisation de l'utilisation de la capacité est l'objectif le plus clairement défini.

ITEM 43 : Les outils informatiques et les systèmes d'information qui sont utilisés dans le processus PDP sont intégrés. L'intégration concerne le partage des données, des processus opérationnels et des sources de données à l'intérieur d'une entreprise ou entre l'entreprise et ses partenaires

50 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables.

Les avis donnés pour cet item montrent une disparité d'opinions concernant l'intégration des outils et systèmes d'information exploités dans le processus PDP. À partir de la définition d'intégration donnée dans l'intitulé et les réponses recueillies, il est possible de conclure que l'intégration n'est pas déployée de la même façon dans tous les secteurs du groupe.

ITEM 23 : Le planning proposé par le PDP est adaptable face à l'annulation d'une commande client

50 % d'avis favorables, 25 % d'avis défavorables et 25 % ne savent pas.

Les participants sont majoritairement d'accord avec cette affirmation. Cependant, certains se disent d'accord avec le principe, mais ils remarquent que lorsque la commande est à planifier dans le PDP c'est compliqué d'accepter une annulation de la part du client. Certains participants ne savent pas si le PDP permet de considérer l'annulation des commandes. Ils précisent ceci est une décision associée au rôle du chef planificateur.

ITEM 9 : Les données pour la préparation des réunions du PDP sont principalement extraites d'un système ERP (Sage X3)

50 % d'avis favorables et 50 % d'avis défavorables

Certains participants précisent qu'il y a des données qui ne sont pas extraites de l'ERP, tel que la capacité. Par rapport le calcul de la charge, certains participants indiquent que les temps de fabrication renseignés dans l'ERP étaient peu fiables.

ITEM 18 : Les informations concernant les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à disposition par le biais de l'ERP (Sage X3)

48 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables et 13 % ne savent pas

La diversité d'avis par rapport cette affirmation est associée au site de fabrication dans lequel les participants travaillent. Les participants avec un avis défavorable indiquent que le processus de partage des informations du PDP est très peu automatisé. Le manque d'automatisation rend très compliquée la mise à jour des informations dans l'ERP. Les participants remarquent que ce serait idéal de pouvoir accéder aux informations du PDP par le biais de l'ERP du groupe. Les participants avec un avis favorable précisent que certaines informations des réunions PDP telles que le statut des commandes clients et les besoins d'approvisionnement peuvent être retrouvées dans l'ERP.

ITEM 22 : Le planning proposé par le PDP est adaptable face aux changements des délais de livraison des commandes des clients

45 % d'avis favorables, 18 % d'avis mitigés, 27 % d'avis défavorables et 10 % ne savent pas

Les avis des enquêtés, par rapport cette affirmation, sont majoritairement favorables. Cependant, les participants indiquent qu'ils étaient d'accord avec le principe, mais qu'actuellement dans la pratique ces changements ne sont pas pris en compte par le PDP. Les participants avec un avis défavorable précisent que dû au retard les clients demandent très rarement un changement dans le délai de livraison. Ces changements sont principalement générés à l'interne.

ITEM 21 : Le planning proposé par le PDP est flexible vis-à-vis des matières premières manquantes ères

45 % d'avis favorables, 18 % d'avis mitigés, 2 % d'avis défavorables et 10 % ne savent pas

Une partie des participants avec un avis favorable pour cette affirmation indiquent qu'ils sont d'accord sur le principe, mais actuellement le PDP n'est pas adaptable vis –à-vis une rupture

de matières premières. Les participants défavorables à cette affirmation ont précisé que le PDP prend en compte les manquants des matières premières uniquement si cela a un impact sur la production. Les participants avec un avis mitigé pour cette affirmation précisent qu'il y a souvent des écarts entre les inventaires informatiques et physiques.

ITEM 1 : Les données sur la charge et la capacité extraites des décisions du PIC sont très utilisées dans le processus du PDP

33 % d'avis favorables, 50 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Les avis des participants sont variables en fonction du site de production. Dans certains sites de production, l'alignement des données PDP-PIC au niveau de charge-capacité permet d'assurer la faisabilité des plans. Dans d'autres sites, les données sur la charge et la capacité du PIC ne sont pas exploitées dans le PDP.

ITEM 29 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement fournit une base pour l'activité d'approvisionnement/le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour l'activité du responsable ordonnancement

33 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 33 % ne savent pas

Les participants précisent qu'actuellement le plan d'approvisionnement (mis à jour) fournit une base pour l'activité du responsable d'ordonnancement. Cependant, ils remarquent que l'activité de l'ordonnancement ne fournit pas une base pour l'activité d'approvisionnement.

ITEM 37: La préparation des réunions PDP est un procès clairement défini de l'entreprise

33 % d'avis favorables, 33 % d'avis mitigés et 33 % d'avis défavorables

Très peu de participants considèrent que le procès de préparation des réunions PDP soit clair.

ITEM 3 : Les prévisions de la demande sont des données d'entrée essentielles du PDP

33 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 50 % d'avis défavorables

Les participants ayant donné un avis défavorable à cette affirmation précisent que les prévisions de la demande entendue comme les prévisions des clients ne sont pas essentielles pour le PDP.

ITEM 32 : Les participants aux réunions PDP défendent fréquemment des objectifs différents comme la diminution des coûts, l'optimisation des capacités, la maximisation du taux de service  
33 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés, 33 % d'avis défavorables et 17 % ne savent pas

La répartition des avis des participants est éclairée par les objectifs du PDP pour chaque secteur. Certains participants précisent que l'objectif principal du PDP est la réduction du retard. Dans autres secteurs l'objectif du PDP est de maintenir les engagements avec les clients. Les participants indiquent que la diminution des coûts et l'amélioration du taux de service ne sont pas des objectifs suivis par le PDP. Les participants considèrent que les modèles actuellement exploités ne permettent pas d'effectuer de simulations de priorité des objectifs.

ITEM 41 : Il existe un processus de communication clair entre les participants du PDP

33 % d'avis favorables, 50 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Les participants considèrent que les processus de communication sont plus ou moins définis en fonction des interlocuteurs. Certains interlocuteurs précisent que la communication est très claire entre les interfaces de production et Supply Chain. D'autres considèrent qu'il y a un manque d'outils pour la communication.

ITEM 39: Le déroulement des réunions PDP est un procès clairement défini de l'entreprise

33 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 50 % d'avis défavorables

La moitié des participants ne considèrent pas que le procès de déroulement des réunions PDP soit clair. Certains participants expriment un manque des outils de support pour le déroulement des réunions.

ITEM 36 : Le processus PDP est clairement défini dans l'entreprise

33 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 50 % d'avis défavorables

La clarté du processus PDP dépend fortement du secteur et du site de production.

ITEM 14 : Le lancement des ordres de fabrication respecte le PDP

25 % d'avis favorables, 50 % d'avis mitigés, 12 % d'avis défavorables et 12 % ne savent pas

Les participants ayant donné un avis mitigé considèrent que l'un des objectifs du PDP est d'aligner le lancement des ordres de fabrication avec le PDP. Ce procès est en cours d'implantation. Néanmoins, il n'existe pas des indicateurs permettant de mesurer cet écart.

ITEM 34 : Les données d'entrée requises pour le processus PDP sont clairement identifiées

38 % d'avis favorables, 38 % d'avis mitigés, 13 % d'avis défavorables et 12 % ne savent pas

Les avis mitigés peuvent s'expliquer du fait que les participants considèrent que la qualité des données d'entrée issus de l'ERP n'est pas fiable. Notamment des données comme les temps de fabrication, temps de gammes et productivité.

ITEM 26 : Le PDP a optimisé l'utilisation des ressources impliquées dans le processus de planification de la production.

25 % d'avis favorables, 25 % d'avis mitigés, 25 % d'avis défavorables et 25 % ne savent pas

Les participants mitigés par rapport cette affirmation précise que l'optimisation de l'utilisation des ressources n'est pas encore suffisante. Les participants qui n'exécutent pas la fonction du Chef Planificateur, considèrent qu'il y a un manque des indicateurs leur permettant de mesurer l'impact du PDP dans l'utilisation capacitaire.

ITEM 10 : Les processus de prise de décision du PDP sont actuellement soutenus par un ERP (Sage X3)

25 % d'avis favorables, 50 % d'avis défavorables et 25 % ne savent pas

La version actuelle de l'ERP ne soutient pas la prise de décisions associées au PDP.

ITEM 16 : Les propositions du PDP sont alignées avec le PIC

17 % avis favorable, 33 % avis mitigés, 33 % avis défavorables et 17 % ne savent pas

Les participants avec un avis défavorable et mitigé précisent que sur la théorie les propositions du PDP devraient être alignées avec le PIC, mais sur la pratique ce n'est pas le cas. Les participants disent que les données du PDP proviennent principalement des commandes clients.

ITEM 25 : La production suit le planning du PDP sans changement

17 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés, 33 % d'avis défavorables et 33 % ne savent pas

Les avis donnés par les participants par rapport cette affirmation dépend du site de fabrication dans lequel ils travaillent. Dans l'un de sites les participants considèrent que l'alignement de la production avec le PDP est un point à améliorer. Dans l'autre site, les participants considèrent que la production respecte le planning proposé par le PDP sauf quand il y a des aléas de production (tels que : panne de machine, matière première insuffisante).

ITEM 24 : La différence entre les commandes acceptées et les commandes exécutées a été réduite par le PDP

13 % d'avis favorables, 13 % d'avis mitigés, 12 % d'avis défavorables, 50 % ne savent pas et 12 % ne veulent pas répondre

La majorité des participants indiquent qu'ils ne savent pas se positionner par rapport cette affirmation. Ils remarquent l'absence des indicateurs leur permettant de mesurer la différence entre les commandes acceptées et les commandes exécutées. Les participants avec des avis favorables, défavorables et mitigés ne laissent pas de commentaires nous permettant de comprendre leur choix. Finalement, les participants qui ne veulent pas répondre considèrent que la question était dehors leur périmètre.

ITEM 19 : Le planning proposé par le PDP est très adaptable vis-à-vis des pannes des machines

12 % d'avis favorables, 38 % d'avis mitigés, 38 % d'avis défavorables et 12 % ne savent pas

Les participants avec un avis défavorable précisent que le PDP n'est pas réactif envers des perturbations internes. Les participants avec un avis mitigé indiquent que la mise à jour du planning PDP suite à la panne d'une machine implique des changements manuels. Certains participants indiquent qu'ils n'ont jamais considéré les pannes de machines dans le processus du PDP.

ITEM 27 : Le PDP actuel a eu une incidence positive sur le taux de service aux clients

12 % d'avis favorables, 38 % d'avis mitigés et 50 % d'avis défavorables

Les participants sont majoritairement défavorables par rapport cette affirmation. Ils considèrent que le respect des délais envers les clients doit être amélioré. Un indicateur a été mis en place pour déterminer la quantité des commandes clients livrées à temps (OTD). Les personnes qui sont mitigés, considèrent que le PDP est mise à jour très fréquemment (hebdomadaire) ce qui diminue la fiabilité des informations communiquées aux clients.

ITEM 20 : Le planning proposé par le PDP résulte flexible vis-à-vis de l'absentéisme

10 % d'avis favorables, 20 % d'avis mitigés, 50 % d'avis défavorables et 20 % ne savent pas.

Certains participants avec un avis défavorable précisent qu'un pourcentage d'absentéisme est intégré dans le calcul capacitaire. Cependant, ce pourcentage ne reflète pas exactement le vrai taux d'absentéisme. Cela a un impact sur le planning proposé par le PDP. D'autres participants remarquent que le PDP étant figé pour les mois à venir ne permet pas de prendre en compte l'absentéisme.

ITEM 28 : Le PDP actuel a eu une incidence positive sur le taux de rotation des stocks

33 % d'avis mitigés, 33 % d'avis défavorables et 33 % ne savent pas

Les participants avec un avis mitigé précisent que l'optimisation des stocks n'est pas complètement intégrée dans le processus du PDP. Les participants avec un avis défavorable par rapport cette affirmation, indiquent que les niveaux de stock sont en train d'augmenter et le taux de rotation ne présente pas de progression.

## Thématique- Prise de décisions PDP

ITEM 1 : La disponibilité des matières premières a une influence sur les décisions relatives au processus PDP

100 % d'avis favorables.

Le groupe de participants considère que la disponibilité de matières est une donnée d'entrée fondamentale du PDP. La notion de plus long délai cumulé n'est pas répandue parmi les interlocuteurs du PDP. Uniquement une personne, parmi les enquêtés, a précisé que la disponibilité de matières a une influence sur les décisions PDP si le lead time demandé par le client est inférieur à la somme des lead time approvisionnement et production.

ITEM 4 : L'utilisation des ressources a une forte influence sur les décisions du PDP

100 % d'avis favorables

Les participants considèrent que le fait d'avoir principalement des collaborateurs qui assurent la production dans différents postes de charge est une raison que peut expliquer l'influence de cette donnée sur le PDP.

ITEM 3 : La stabilité de la production a une forte influence sur les décisions du PDP

67 % avis favorable, 16 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Les participants considèrent majoritairement que la stabilité de la production a une influence sur les décisions du PDP. Parmi les interlocuteurs avec un avis défavorable à ce sujet ils évoquent que la stabilité de la production est une hypothèse pour le PDP.

ITEM 7 : les décisions prises lors des réunions du PDP sont fréquemment mises à jour

67 % d'avis favorables, 16 % d'avis mitigés et 17 % d'avis défavorables

Les participants avec un avis favorable à ce sujet précisent que les aléas de production et d'approvisionnement sont des causes de la mise à jour fréquente du PDP. En fonction du site et du secteur de production, le respect des décisions des réunions PDP varie.

ITEM 6 : Le niveau du stock a une forte influence sur les décisions du PPD

67 % d'avis favorables et 33 % d'avis défavorables

Les participants sont majoritairement d'accord sur l'influence du niveau de stock sur les décisions du PDP. Les avis défavorables, à ce sujet, font une distinction entre stock de matières premières-composants et stock des produits finis.

ITEM 5 : Le niveau de service a une forte influence sur les décisions du PDP

50 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés, 17 % d'avis défavorables et 16 % ne savent pas

Les participants n'ont pas la même vision par rapport l'influence du niveau de service sur les décisions du PDP. En fonction de la définition qu'ils ont donnée du niveau de service leurs avis sont favorables ou pas.

ITEM 2 : Les outils exploités dans les processus PDP présentent un haut niveau d'automatisation

17 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés, 50 % d'avis défavorables et 16 % ne savent pas

Les participants précisent que la plupart des outils exploités dans les processus PDP sont manuels. En fonction du secteur de travail, les participants ont des avis différents sur le niveau d'automatisation. Ils soulignent également qu'avec la nouvelle version de l'ERP, le PDP sera automatisé.

## Thématique-Caractéristiques du Marché

ITEM 1 : La pression exercée par les clients sur les délais de livraison est très forte

100 % d'avis favorables

D'après les participants cette pression peut être due à la sous-performance du taux de service depuis les deux dernières années.

ITEM 3 : La demande est caractérisée par de grandes variations

50 % d'avis favorables, 10 % d'avis mitigés, 20 % d'avis défavorables et 20 % ne savent pas

Les avis favorables considèrent que la récurrence de demande du même produit est très faible d'où la grande variabilité.

Les avis défavorables se fondent sur l'existence d'une variabilité dans l'horizon du long terme, mais pas dans celui du PDP.

ITEM 2 : La demande est fortement caractérisée par l'incertitude

40 % d'avis favorables, 10 % d'avis mitigés, 40 % d'avis défavorables et 10 % ne savent pas

Les avis favorables sont justifiés par la conformité finale de la pièce par rapport le cahier de charges du client.

Les avis défavorables sont justifiés par le fait qu'il y a un carnet de commandes fermes dans un horizon d'environ 9 mois. La demande dans l'horizon du PDP n'a pas d'incertitude.

## Thématique- Retard Commandes clients

ITEM 2 : Les problèmes de dimensionnement de la capacité des ressources ont une forte influence sur le retard de commandes des clients

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

Les participants sont majoritairement favorables pour cette affirmation. Ils considèrent que les problèmes de dimensionnement de la capacité sont la cause principale du retard de commandes clients. Les personnes mitigées par rapport cette affirmation, précisent que ceci a un impact sur le retard envers le client, mais que ce n'est pas la cause principale du retard. Ils disent qu'en fonction de la ligne de production l'impact peut être plus ou moins faible.

ITEM 1 : Le retard de fournisseurs a une forte influence sur le retard de commandes des clients

73 % d'avis favorables, 18 % d'avis mitigés et 9 % ne savent pas

Même si la majorité des participants sont favorables à cette affirmation, ils considèrent que le retard de fournisseurs n'est pas la cause principale du retard envers les clients. Les participants mitigés pour cette affirmation précisent que le retard de commandes des clients est principalement associé à des problèmes de capacité et des problèmes techniques. Ainsi, il est compliqué de déterminer l'impact du retard de fournisseurs sur le retard envers les clients.

ITEM 4 : La sous-estimation des temps de conception et d'industrialisation a une forte influence sur le retard de commandes des clients

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

Certains participants considèrent que cette affirmation est valable pour les secteurs qui ont une stratégie de production ETO (engineering to order). Les personnes avec un avis mitigé considèrent que l'influence de la sous-estimation du retard de commandes des clients est très faible.

ITEM 5 : L'écart entre les retours d'information en temps réel de l'atelier et le processus de planification a une forte influence sur le retard de commandes des clients

67 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigé, 17 % d'avis défavorables et 8 % de veulent pas répondre

Même si la plupart des avis sont favorables pour cette affirmation les participants considèrent qu'il y a un manque des outils pour le suivi de la quantité produite vs la quantité planifiée. Ceci entraîne de problèmes de dimensionnement capacitaire reliés à la disponibilité de ressources. Les personnes avec un avis défavorable par rapport cette affirmation ne considère pas qu'il soit nécessaire de faire un retour d'information en temps réel. Un suivi hebdomadaire pourrait être suffisant.

ITEM 3 : Le manque de visibilité de la charge a une forte influence sur le retard de commandes des clients

42 % d'avis favorables, 17 % d'avis mitigés et 42 % d'avis défavorables

Les avis favorables pour cette affirmation sont justifiés à partir de la charge réelle laquelle comporte la charge associée au carnet de commandes et la charge reliée au retard de commandes. La méconnaissance de la valeur de la charge associée au retard entraîne des problèmes de dimensionnement capacitaire. Les participants avec un avis défavorable par rapport cette affirmation précisent que la visibilité de la charge est claire pour un horizon de neuf mois. Ils précisent également qu'il faut déterminer la capacité des lignes de production pour limiter le retard.

## Annexe 3 Matrices des résultats Premier Tour

Les caisses avec remplissage gris concernent des items pour lesquels le participant n'était pas consulté.

### Thématique- Caractéristiques du processus PDP

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
96	54	53	28	31	34	0
32%	18%	18%	9%	10%	11%	0%

ID item	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
4	Les commandes clients sont une donnée d'entrée essentielle du PDP													
38	Le PDP se déroule dans le cadre de réunions consécutives dont les objectifs sont clairement énoncés													
12	Le PDP fournit une base pour le planning proposé par le responsable de l'ordonnancement													
13	Le PDP établit une base importante pour l'activité d'approvisionnement													
17	Les informations concernant les décisions prises lors des réunions du PDP sont mises à disposition via un outil de support informatique (Excel)													
31	Il existe un environnement de coopération efficace et actif entre les départements des ventes, de la production et supply chain													
8	Les données pour la préparation des réunions PDP sont principalement récupérées à l'aide d'un outil informatique (Excel)													
35	Le processus PDP implique des personnes de différents départements (ventes, production, approvisionnement, ordonnancement, planificateur principal, directeur de la qualité)													
5	La détermination de la disponibilité des matières premières est un élément essentiel du processus de planification du PDP													
2	Les données sur les en-cours sont très utilisées dans le processus/ le planning du PDP													
7	Les décisions prises lors des réunions PDP sont des données essentielles pour l'élaboration du planning final du PDP													
11	Les processus de prise de décision du PDP sont actuellement soutenus par un outil d'informatique (Excel)													
15	Les responsables commerciaux communiquent le retard aux clients sur la base du PDP													
30	Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement sert de base à l'activité du responsable de production/Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour l'activité du responsable de production													
6	Les macros gammes et les macros nomenclatures de production sont des données d'entrée importantes du processus de planification du PDP													
40	L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée à tous les participants													
42	Les outils informatiques et les systèmes d'information disponibles constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP													
33	L'objectif du PDP est clairement défini													



## Thématique- Prise de décisions PDP

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
24	4	1	1	0	2	0
73%	12%	3%	3%	0%	6%	0%

ID item	Item													
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
1	La disponibilité des matières premières a une influence sur les décisions relatives au processus PDP													
4	L'utilisation des ressources a une forte influence sur les décisions du PDP													
3	La stabilité de la production a une forte influence sur les décisions du PDP													
7	les décisions prises lors des réunions du PDP sont fréquemment mises à jour													
6	Le niveau du stock a une forte influence sur les décisions du PPD													
5	Le niveau de service a une forte influence sur les décisions du PDP													
2	Les outils exploités dans les processus PDP présentent un haut niveau d'automatisation													

## Thématique-Caractéristiques du Marché

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
11	8	2	4	2	3	0
37%	27%	7%	13%	7%	10%	0%

ID item	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
1	La pression exercée par les clients sur les délais de livraison est très forte													
3	La demande est caractérisée par de grandes variations													
2	La demande est fortement caractérisée par l'incertitude													

## Thématique- Retard Commandes clients

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
21	17	10	8	0	0	0
38%	30%	18%	14%	0%	0%	0%

ID item	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
2	Les problèmes de dimensionnement de la capacité des ressources ont une forte influence sur le retard de commandes des clients													
1	Le retard de fournisseurs a une forte influence sur le retard de commandes des clients													
4	La sous-estimation des temps de conception et d'industrialisation a une forte influence sur le retard de commandes des clients													
5	L'écart entre les retours d'information en temps réel de l'atelier et le processus de planification a une forte influence sur le retard de commandes des clients													
3	Le manque de visibilité de la charge a une forte influence sur le retard de commandes des clients													

## Annexe 4 Questionnaire Second Tour

### Caractéristiques du processus PDP

ITEM 1 : Les données de charge-capacité du PDP doivent être les plus alignées possible avec les conditions en « temps réel » des ateliers de production.

ITEM 2 : Les données des « en-cours » issues de l'ERP sont fiables pour utilisation dans le PDP.

ITEM 3 : Les données des « en-cours » pour le PDP sont issues des calculs faits avec des outils informatiques.

ITEM 4 : Les prévisions commerciales sont des données d'entrée actuellement employées par le PDP.

ITEM 5 : Les données du carnet de commandes clients dans l'horizon PDP sont actuellement employées telles qu'elles en entrée par le PDP.

ITEM 6 : Les gammes de fabrication sont des données d'entrée actuellement exploitées pour l'élaboration du PDP.

ITEM 7 : Les macro-gammes de fabrication sont des données d'entrée actuellement exploitées pour l'élaboration du PDP.

ITEM 8 : Les nouvelles dates de lancement des ordres de fabrication, issues du repositionnement du traitement des commandes défini lors des réunions du PDP, sont mises à jour dans l'ERP.

ITEM 9 : Les décisions prises lors des réunions du PDP sont issues de l'exploitation des données par le biais de l'ERP (Sage X3).

ITEM 10 : Le PDP permet actuellement de simuler les variations capacitaires générées par l'absentéisme.

ITEM 11 : L'objectif principal du PDP est actuellement de diminuer le retard de livraison de commandes clients existantes.

ITEM 12 : Les interlocuteurs comptent actuellement avec les outils nécessaires pour le support à la prise décisions du PDP.

ITEM 13 : La diminution du retard est l'un des objectifs principaux du PDP actuel.

ITEM 14 : L'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible est l'un des objectifs principaux du PDP.

ITEM 15 : Les outils informatiques actuellement exploités dans le processus du PDP permettent de simuler différents scénarios pour aider dans la prise des décisions.

ITEM 16 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement fournit une base pour le processus PDP actuel.

ITEM 17 : Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour le processus décisionnel du PDP actuel.

ITEM 18 : Dans le processus PDP actuelle, il existe une coopération efficace et active entre les départements de ventes et Supply Chain.

ITEM 19 : Dans le processus PDP actuelle, il existe une coopération efficace et active entre les départements de la production et Supply Chain.

ITEM 20 : Les participants/parties prenantes du processus PDP actuel ont été clairement désignés.

ITEM 21 : Les étapes du processus PDP actuel ont été clairement définies.

ITEM 22 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme du plan de production.

ITEM 23 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme du plan d'action.

ITEM 24 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme de compte rendu.

ITEM 25 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la réactivité des plans proposés. La réactivité est la capacité à réagir à un changement dans l'environnement en temps opportun.

ITEM 26: Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la flexibilité des plans proposés. La flexibilité concerne l'utilisation de multiples façons de réussir et la capacité de les relier de façon transparente.

ITEM 27 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la robustesse des plans proposés. La robustesse est la capacité de maintenir l'efficacité dans un ensemble des tâches, de situations et de conditions.

ITEM 28 : Le respect des délais de livraison promis aux clients est l'un des objectifs principaux du PDP.

ITEM 29 : Les outils informatiques du type Excel actuellement disponibles permettent de visualiser la charge-capacité dans l'horizon PDP.

ITEM 30 : Le système ERP (Sage X3) actuellement disponible permet de visualiser la charge-capacité dans l'horizon PDP.

ITEM 31 : Les outils informatiques du type Excel disponible permettent de connaître le Lead Time critique/de calculer le plus long délai cumulé (ceci étant le plus long délai d'approvisionnement + le plus long délai de production).

ITEM 32 : Le système ERP (Sage X3) actuellement disponible permettent de connaître le Lead Time critique/de calculer le plus long délai cumulé (ceci étant le plus long délai d'approvisionnement + le plus long délai de production).

ITEM 33 : Le partage des données liées au PDP est assuré par l'intégration de l'ERP et les outils informatiques exploités par les utilisateurs.

ITEM 34 : Le partage de processus liés au PDP est assuré par l'intégration de l'ERP et les outils informatiques exploités par les utilisateurs.

ITEM 35 : L'ERP (Sage X3) constitue une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.

ITEM 36: Les outils customisés du type Excel constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.

## Prise de décisions PDP

ITEM 1 : Les propositions du PDP prennent actuellement en compte la disponibilité des matières premières.

ITEM 2 : Les délais de traitement de commandes proposés aux clients considèrent le temps d'approvisionnement et le temps de production. Les délais de traitement de commandes proposés aux clients sont calculés sur la base du plus long délai cumulé (plus long délai d'approvisionnement + plus long délai de production).

ITEM 3 : La stabilité de la production est considérée comme une hypothèse dans le processus PDP actuel.

ITEM 4 : La stabilité de la production est régulièrement vérifiée dans le processus PDP actuel.

ITEM 5 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la légitimité des décisions prises lors des réunions.

## Caractéristiques du marché

ITEM 1 : Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) le carnet de commandes des clients est plein.

ITEM 2 : Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) la demande n'est pas caractérisée par de grandes variations.

## Retard Commandes clients

ITEM 1 : Un suivi hebdomadaire de la quantité produite vs la quantité planifiée s'avère indispensable pour le processus du PDP actuel.

## Annexe 5 Synthèse Second Tour

Ce second questionnaire a été construit à partir des commentaires laissés par les participants sur les différents items du premier questionnaire. Notre objectif était de mieux préciser les caractéristiques du processus PDP chez Exxelia sur des items du premier questionnaire pour lesquels nous n'avons pas trouvé de consensus.

Nous présentons d'abord une synthèse, au niveau de détail de la thématique, pour les idées les plus remarquables de ce deuxième tour. Ensuite, nous proposons des analyses pour chacun des items du questionnaire.

L'analyse des résultats a été réalisée en considérant les consensus à partir de 80 % d'avis favorables ou défavorables. Les autres résultats ont été considérés comme dissensus.

### Caractéristiques du processus PDP

Dans le but de caractériser le processus PDP nous avons proposé des affirmations par rapport aux données employées, les sources des données exploitées, les objectifs du processus PDP, les dimensions de l'agilité dans le PDP et la formalisation du processus.

Le premier questionnaire nous a permis d'identifier certaines données d'entrée essentielles dans le processus PDP, telles que : les commandes clients, la disponibilité des matières et la capacité disponible. Nous avons proposé des affirmations pour préciser l'utilisation de ces données.

Les participants considèrent que les données de charge-capacité enregistrées dans l'ERP doivent être les plus alignées possible avec les conditions réelles des ateliers de production (Item 1). Ceci permettra de proposer des programmes faisables.

Les commandes des clients fermes dans l'horizon PDP sont des données d'entrée essentielles du PDP (Item 5). Cependant, les prévisions commerciales ne sont pas utilisées actuellement dans le PDP (Item 4).

La disponibilité des matières, récupérée à partir du plan d'approvisionnement, est un élément indispensable pour la prise de décisions du PDP (Item 17).

Les réponses du premier tour n'ont pas été assez claires concernant si les données des en-cours, macro-gammes et prévisions de demande étaient ou pas utilisées dans le PDP. Nous avons

proposé des items pour vérifier ceci et comprendre les causes de la non-exploitation de ces données dans le processus PDP.

Les participants sont majoritairement d'accord sur l'utilisation des gammes pour le calcul de la charge dans l'horizon PDP (Item 6). Cependant, les données ne sont pas à jour. Les gammes sont inexistantes dans la version actuelle de l'ERP (Item 7).

Les données des en-cours sont employées dans le PDP, mais elles ne sont pas fiables si leur extraction est faite de l'ERP (Items 2 et 3).

Le PDP est une base pour le plan d'ordonnancement (Item 16). Néanmoins, les participants sont plutôt mitigés et défavorables sur la mise à jour, dans l'ERP, des nouvelles dates de lancement des ordres de fabrication issus des repositionnements PDP (Item 8).

Dans le premier tour, il n'a pas été possible d'identifier les objectifs du PDP. Nous nous sommes appuyés sur les objectifs proposés dans les commentaires laissés par les participants du premier tour.

L'un des objectifs principaux du PDP est le respect des délais de livraison promis aux clients (Item 28). La communication des changements des dates de livraison (fiabilisation des livraisons) est un autre objectif primordial du PDP (Items 11 et 13).

Les participants sont plutôt favorables à la diminution du retard comme l'un des objectifs principaux du PDP (Items 11 et 13). L'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible est un autre objectif du processus (Item 14).

Dans le premier tour, nous avons enquêté à propos de l'adaptabilité du PDP. Les participants n'ont pas jugé que le PDP était adaptable. L'adaptabilité étant l'une des dimensions de l'agilité, nous avons proposé des items pour enquêter sur d'autres dimensions. Les participants sont plutôt favorables au fait que le PDP assure la robustesse des plans proposés (Item 26).

Il n'est pas clair pour les participants si le PDP assure la flexibilité des plans proposés (Item 26), parce qu'il ne permet pas d'incorporer la polyvalence des collaborateurs. Également, il

n'est pas clair pour les participants si le PDP assure la réactivité (Item 25). Cependant, le PDP considère la disponibilité des matières et le rapport charge capacité pour proposer un nouveau plan, mais il ne permet pas de simuler des variations capacitaires (Item 10).

Dans le premier tour, les participants ont indiqué que le processus PDP n'avait pas été clairement défini. Nous avons proposé différents items pour préciser ceci.

Les participants sont plutôt favorables et mitigés par rapport à la désignation des parties prenantes du processus PDP (Item 2). Cependant, ils sont conscients du caractère collaboratif du PDP. Ce processus a besoin d'une communication efficace et active entre les départements de production et Supply Chain (Item 19). Par contre, les participants sont plutôt mitigés et défavorables à une coopération entre les départements commercial et Supply Chain (Item 18).

En fonction du secteur de production les avis des participants sont différents par rapport au partage d'informations des réunions PDP, sous forme de plan de production (Item 22), plan d'action (Item 23) et compte rendu (Item 24). Les avis défavorables et mitigés s'expliquent par une mise en place du processus en cours de déploiement. Il semblerait que les étapes du PDP n'ont pas été clairement définies.

En ce qui concerne les outils exploités dans le PDP, les participants sont majoritairement favorables au fait qu'Excel constitue un bon support pour la prise de décisions. Cet outil est exploité pour visualiser le rapport charge-capacité. Cependant les participants se méfient de la fiabilité des données exploitées (Item 36).

Les données sont majoritairement issues de l'ERP (Item 9). Le partage des données du PDP est assuré par l'intégration de l'ERP et des outils du type Excel (Item 33). Il n'est pas clair pour la plupart des participants si le partage de processus est assuré par l'ERP et Excel (Item 34).

La majorité des participants est mitigée ou défavorable par rapport la disponibilité des outils nécessaires pour le support à la prise de décisions (Item 12). Les participants se considèrent démunis pour la prise de décisions.

Ils sont majoritairement mitigés sur le soutien de l'ERP dans le processus décisionnel. Cet outil manque de fonctionnalités. Il ne permet pas de visualiser le rapport charge-capacité dans

l'horizon du PDP (Item 30). Les participants sont mitigés ou défavorables par rapport à l'utilisation de l'ERP pour connaître le lead-time critique (Item 32). Comme les données de l'ERP ne sont pas justes, les participants font beaucoup d'estimations pour calculer le lead-time critique (Item 32).

Le manque de fonctionnalités dans l'ERP force les participants à exploiter des outils complémentaires du type BI (Business Intelligence) ou Excel (Item 35).

Finalement, les participants ont indiqué qu'ils manquent d'outils pour simuler différents scénarios et supporter ainsi la prise de décisions.

## Prise de décisions PDP

Les propositions du PDP sont fortement influencées par la disponibilité des matières premières (Item 1). Dans le premier tour, les participants ont indiqué que la stabilité de la production avait une forte influence sur les décisions du PDP. Contrairement à ceci, dans ce deuxième tour la plupart des participants ont indiqué que la production n'est pas considérée stable dans le PDP (Item 3). En effet, la stabilité de la production n'est même pas vérifiée (Item 4). La production est affectée par des aléas (comme la non-conformité des rebuts, des délais d'industrialisation plus longs).

Les participants sont majoritairement d'accord sur la communication des délais de traitement de commandes sur la base du plus long délai cumulé (Item 2).

## Caractéristiques du marché

L'horizon de planification du PDP est différent pour chaque secteur de production. Le carnet de commandes des clients est plein pour des horizons entre 4 et 8 mois en fonction du secteur de production. Ce carnet de commandes fermes est utilisé comme donnée d'entrée du PDP. Dans cet horizon la demande n'a pas de grandes variations. Cependant, dans l'horizon du PDP (Lead Time Critique) la demande est plus ou moins variable en fonction du secteur.

## Retard commandes clients

Dans le tour précédent, les participants avaient indiqué que les problèmes de dimensionnement de la capacité et l'écart entre la planification et le temps réel à l'atelier de production ont une forte influence sur le retard de commandes des clients. Dans ce questionnaire, les participants

ont indiqué que le suivi hebdomadaire de la quantité fabriquée par rapport à la quantité planifiée est indispensable pour replanifier les manquants et communiquer les nouveaux délais.

## Commentaires Item par Item

La synthèse des items est présentée autour de quatre thématiques d'étude suivantes : caractéristiques du PDP, prise de décisions PDP, caractéristiques du marché, retard de commandes clients. Nous présentons les résultats par ordre de consensus favorable décroissant.

### Thématique- Caractéristiques du processus PDP

ITEM 1 : Les données de charge-capacité du PDP doivent être les plus alignées possible avec les conditions en « temps réel » des ateliers de production.

85 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 7 % ne savent pas

L'alignement entre les conditions réelles de production et les données informatiques permettent d'avoir une bonne visibilité de la charge et d'optimiser l'utilisation de la capacité. En conséquence, les participants considèrent que les données de la charge et de la capacité stockées dans l'ERP et exploitées dans le PDP doivent être alignées avec la réalité des lignes de production. Cependant, ils ont exprimé une difficulté pour mettre à jour dans l'ERP, les données de charge et de capacité lorsqu'ils rencontrent des soucis opérationnels.

ITEM 17 : Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour le processus décisionnel du PDP actuel.

85 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 7 % d'avis défavorables

La majorité des participants considèrent que le plan d'approvisionnement mis à jour constitue un élément indispensable pour la prise de décisions associées au PDP. La vérification de la disponibilité de matières premières avant le lancement en production des ordres de fabrication est un processus réalisé dans le processus du PDP.

ITEM 5 : Les données du carnet de commandes clients dans l'horizon PDP sont actuellement employées telles que données d'entrée par le PDP.

77 % d'avis favorables, 23 % ne savent pas

Les participants se sont montrés plutôt favorables à l'exploitation des données de commandes clients (commandes fermes) comme donnée d'entrée du PDP. Certains participants n'ont pas

su répondre à cette question. Il n'est pas clair si tous les participants ont le même niveau de connaissances par rapport les données d'entrée employées dans le PDP.

ITEM 19 : Dans le processus PDP actuelle, il existe une coopération efficace et active entre les départements production et Supply Chain.

77 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables

Les participants avec un avis favorable pour cette affirmation ont précisé que le caractère collaboratif du PDP, implique une coopération entre la production et la Supply Chain. Les personnes avec des avis défavorables et mitigés n'ont pas laissé des commentaires qui expliquent leur choix.

ITEM 28 : Le respect des délais de livraison promis aux clients est l'un des objectifs principaux du PDP.

77 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 7 % ne savent pas

L'avis majoritairement favorable pour cette affirmation montre qu'en effet le respect des délais de livraison est un objectif primordial du PDP. Certains participants, ayant donné un avis favorable à cette affirmation, considèrent pourtant qu'il est très compliqué d'assurer la stabilité du plan. Ceci constitue la base des avis mitigés également. En effet, les participants ayant donné un avis mitigé considèrent que le PDP n'est pas actuellement suffisant pour respecter le délai promis aux clients. Ils mentionnent qu'il est nécessaire de consulter la disponibilité des matières pour pouvoir donner un délai de livraison fiable.

ITEM 13 : La diminution du retard est l'un des objectifs principaux du PDP actuel.

~ ITEM 11 : L'objectif principal du PDP est actuellement de diminuer le retard de livraison des commandes clients existantes.

69 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas

62 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 23 % d'avis défavorables

Les participants avec un avis favorable pour cette affirmation ont précisé que la diminution du retard n'est pas le seul objectif du PDP. Ils considèrent qu'il s'agit aussi de pouvoir communiquer à temps des changements des dates de livraison. La fiabilisation des livraisons est l'objectif principal du PDP selon les participants avec un avis défavorable.

Les participants avec un avis mitigé considèrent que la diminution du retard devient l'objectif principal du PDP si la gestion du retard est prévue. Autrement, l'objectif est de supporter la prise de décision dans des conditions de déséquilibre entre la charge et la capacité.

Les participants qui n'ont pas su se positionner par rapport à l'affirmation ont indiqué que la diminution du retard est une donnée d'entrée du PDP et pas un objectif. Pour eux, l'objectif du PDP est de définir un plan convenable aux exigences des différentes parties prenantes.

ITEM 36 : Les outils customisés du type Excel constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.

69 % d'avis favorables, 23 % d'avis mitigés, 8 % ne savent pas

La majorité de participants considère que les outils du type Excel constituent actuellement une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP. Ils ont précisé que l'efficacité de ces outils dépend fortement de la fiabilité des données exploitées.

ITEM 9 : Les décisions prises lors des réunions du PDP sont issues de l'exploitation des données par le biais de l'ERP (Sage-X3).

62 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 7 % d'avis défavorables

La majorité des participants est d'accord avec cette affirmation. Cependant, aucun participant avec un avis favorable n'a laissé de commentaires permettant de justifier leur choix.

Les participants avec un avis mitigé ont précisé que les données utilisées pour la prise de décisions du PDP sont issues majoritairement de l'ERP. Cependant, ceci n'est pas la seule source de données exploitée.

ITEM 14 : L'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible est l'un des objectifs principaux du PDP.

62 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas

Les participants avec un avis favorable ont précisé que l'optimisation de l'utilisation de la capacité permettrait de produire plus et en conséquence de livrer plus. Pour eux, l'optimisation de la capacité constitue donc un des objectifs principaux du PDP.

ITEM 27 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la robustesse des plans proposés. La robustesse est la capacité de maintenir l'efficacité dans un ensemble de tâches, de situations et de conditions.

62 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas  
Même si la majorité des participants s'est montrée favorable à cette affirmation aucun commentaire permettant de comprendre leur choix n'a été laissé. Les participants qui n'ont pas su se positionner par rapport cette affirmation étaient plutôt favorables. En effet, dans leurs commentaires ils spécifient que le plan livré par le PDP doit être faisable ce qui assure en conséquence sa robustesse.

ITEM 29 : Les outils informatiques de type Excel actuellement disponibles permettent de visualiser la charge-capacité dans l'horizon du PDP.

62 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 8 % ne savent pas

Pour les experts avec un avis favorable, Excel permet de visualiser de façon correcte le rapport charge-capacité uniquement si les données extraites de l'ERP sont fiables.

Les participants avec un avis mitigé indiquent que ces outils informatiques permettent uniquement, d'avoir une vision macro de la capacité démontrée.

ITEM 33 : Le partage de données liées au PDP est assuré par l'intégration de l'ERP et les outils informatiques exploités par les utilisateurs.

62 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 22 % ne savent pas

La majorité des participants considèrent que l'intégration de l'ERP et les outils informatiques exploités assure le partage des données du PDP.

ITEM 6 : Les gammes de fabrication sont des données d'entrée actuellement exploitées pour l'élaboration du PDP.

54 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables

Les participants avec un avis favorable ont précisé que les données des gammes sont exploitées pour calculer la charge. Ils ont mentionné qu'un travail conjoint avec les responsables des méthodes a comme objectif de mettre à jour les temps des gammes pour être plus juste dans la planification du PDP.

Les participants avec un avis mitigé ont indiqué qu'uniquement les temps de gamme sont utilisés, les opérations de la gamme ne sont pas employées.

ITEM 26 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la flexibilité des plans proposés. La flexibilité concerne l'utilisation de multiples façons de réussir et la capacité de les relier de façon transparente.

46 % d'avis favorables, 23 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
Même si la plupart des participants s'est montrée favorable à cette affirmation, certains participants indiquent que le PDP devrait incorporer la polyvalence pour assurer la flexibilité.

ITEM 3 : Les données d'« en-cours » pour le PDP sont issues des calculs faits avec des outils informatiques

46 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas  
Les avis des participants dépendent fortement du secteur de production dans lequel ils travaillent. Dans certains secteurs les données d'« en-cours » ont dû être retirées du calcul pour éviter d'obtenir des plans faux. Les participants avec un avis défavorable ont indiqué que ces données pouvaient être récupérées à partir des requêtes dans l'ERP et que l'utilisation des outils informatiques n'était pas nécessaire. Cependant, ils ont indiqué que ces données n'étaient pas fiables.

ITEM 22 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme de plan de production

46 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas  
Les avis donnés pour cet item montrent différents niveaux de maturité du processus PDP dans les secteurs de production étudiés. Les participants avec un avis favorable ont indiqué qu'un plan d'action est affiché suite aux réunions PDP. Les participants avec un avis mitigé indiquent que le processus est en cours de formalisation et les informations des réunions ne sont pas diffusées.

ITEM 25 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la réactivité des plans proposés. La réactivité est la capacité à réagir à un changement dans l'environnement en temps opportun.

46 % d'avis favorables, 23 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
Les participants n'ont pas laissé de commentaires permettant de comprendre leur choix. Cependant, ils avaient indiqué dans des items précédents que les décisions du PDP étaient alignées avec la disponibilité des matières premières (Item 17). Ils avaient également évoqué

que le PDP permettait de réagir face aux conditions de déséquilibre entre la charge et la capacité (commentaires Item 13).

ITEM 7 : Les macro-gammes de fabrication sont des données d'entrée actuellement exploitées pour l'élaboration du PDP.

38 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 32 % ne savent pas  
Les participants avec un avis favorable pour cette affirmation font référence à l'exploitation de temps de gamme, mais pas de macro-gammes. À ce propos, les participants avec un avis défavorable précisent que les macro-gammes n'existent pas dans la version actuelle de l'ERP.

ITEM 16 : Le plan proposé par le responsable de l'ordonnancement fournit une base pour le processus PDP actuel.

38 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 38 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas, 8 % ne veulent pas répondre  
Les avis défavorables des participants considèrent que le PDP fournit une base pour le plan d'ordonnancement et pas l'inverse.

ITEM 20 : Les participants/parties prenantes du processus PDP actuel ont été clairement désignés.

38 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 46 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas  
La majorité de participants s'est montrée défavorable concernant cette affirmation. Ils précisent que le PDP est en cours de déploiement dans l'ensemble de secteurs. Les parties prenantes n'ont pas encore été désignées. Les participants avec un avis favorable ont indiqué que dans leur secteur les parties prenantes du PDP sont les suivantes : responsable de bureau d'études, responsable des achats et des approvisionnements, responsable production, responsable des méthodes, responsable commercial et Chef Planificateur.

ITEM 24 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme de compte rendu

38 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 38 % d'avis défavorables, 9 % ne savent pas  
Les avis mitigés et défavorables des experts pour cette affirmation, sont fondés sur le fait que le PDP est en cours de déploiement et le compte rendu est en train d'être formalisé.

ITEM 34 : Le partage de processus liés au PDP est assuré par l'intégration de l'ERP et les outils informatiques exploités par les utilisateurs.

38 % d'avis favorables, 8 % d'avis défavorables, 54 % ne savent pas,

Les participants n'ont pas laissé de commentaires pour cette affirmation. Cependant, à partir de la distribution des affirmations il est possible de constater qu'il y a une partie des participants qui ont accès aux outils informatiques qui permettent de partager les processus du PDP. Une autre partie des interlocuteurs n'a pas accès à ces outils.

ITEM 2 : Les données des « en-cours » issues de l'ERP sont fiables pour utilisation dans le PDP.

31 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés 46 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas

Les participants ayant donné un avis défavorable pour cette affirmation ont remarqué que les données de suivi des ordres de fabrication, dans les ateliers de production, ne sont pas enregistrées dans l'ERP pour la plupart des cas. Quand il y a des données d' « en-cours » ils précisent qu'elles sont fausses.

ITEM 8 : Les nouvelles dates de lancement des ordres de fabrication issue du repositionnement du traitement des commandes défini lors des réunions du PDP sont mises à jour dans l'ERP.

31 % d'avis favorables, 46 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas

Les avis des participants par rapport cette affirmation montrent que la mise à jour des dates de lancement des OF dépend du secteur de production. Les participants avec un avis mitigé précisent que la mise à jour de ces dates dans le système n'est pas automatisée et prend beaucoup de temps. Ils indiquent également que la mise à jour dépend du taux d'adhérence du plan de production au PDP.

ITEM 21 : Les étapes du processus PDP actuel ont été clairement définies.

31 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 46 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas

Les avis des participants pour cette affirmation sont majoritairement défavorables. Ils indiquent que le PDP est en cours de déploiement. Les étapes de ce processus sont en train d'être définies. Ceci a été également la justification des participants avec un avis mitigé.

ITEM 23 : L'information sur les décisions prises lors des réunions du PDP est intégrée et transférée en forme du plan d'action.

31 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
Les avis des participants varient fortement en fonction du secteur de production. Les participants avec un avis favorable indiquent qu'un plan d'action est défini suite aux réunions PDP.

Les participants avec un avis mitigé indiquent que dans leur secteur le format du compte rendu et du plan d'action n'ont pas encore été formalisés.

ITEM 12 : Les interlocuteurs comptent actuellement avec les outils nécessaires pour le support à la prise de décisions du PDP.

23 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 23 % d'avis défavorables, 38 % ne savent pas  
Les participants n'ont pas laissé des commentaires permettant de comprendre leur choix. Cependant, leur positionnement par rapport à l'affirmation permet de conclure que s'il y a des outils pour le support à la prise de décisions du PDP, ils ne sont pas connus par la plupart des interlocuteurs.

ITEM 15 : Les outils informatiques actuellement exploités dans le processus PDP permettent de simuler différents scénarios pour aider dans la prise des décisions.

23 % d'avis favorables, 46 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables  
Les participants avec un avis mitigé ont indiqué que les outils informatiques actuellement exploités dans le PDP ne permettent pas de simuler différents scénarios.

ITEM 18 : Dans le processus PDP actuelle, il existe une coopération efficace et active entre les départements ventes et Supply Chain.

23 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables, 15 % ne savent pas  
La diversité d'avis par rapport cette affirmation est associée au secteur de production. Les participants avec un avis mitigé ont indiqué que le niveau de collaboration entre les deux départements est faible. Cependant, ils considèrent qu'il est indispensable d'avoir une telle collaboration. Les participants avec un avis favorable ont indiqué que le PDP nécessite la collaboration entre les départements de ventes et Supply Chain.

ITEM 31 : Les outils informatiques de type Excel disponible permettent de connaître le Lead Time critique/de calculer le plus long délai cumulé (ceci étant le plus long délai d'approvisionnement + le plus long délai de production).

23 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 46 % d'avis défavorables, 16 % ne savent pas

La plupart des participants ont un avis défavorable pour cette affirmation. Ils considèrent que la valeur du Lead Time critique devrait apparaître dans l'ERP. Ils précisent qu'actuellement aucun outil ne permet pas de calculer cette valeur. En conséquence, les délais donnés aux clients ne sont pas toujours fiables.

ITEM 35 : L'ERP (Sage-X3) constitue une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.

23 % d'avis favorables, 54 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas

La majorité de participants ont un avis mitigé pour cette affirmation. Ils coïncident au manque de fiabilité de données de l'ERP. En plus ils indiquent avoir besoin d'outils complémentaires pour pouvoir soutenir la prise de décisions, tels que BI. Les participants, avec un avis défavorable, ont précisé qu'il existe des écarts considérables entre les informations enregistrées dans l'ERP et l'information réelle. Ces écarts empêchent l'utilisation de données issues de l'ERP pour soutenir le processus décisionnel.

ITEM 4 : Les prévisions commerciales sont des données d'entrée actuellement employées par le PDP.

15 % d'avis favorables, 23 % d'avis mitigés, 46 % d'avis défavorables, 16 % ne savent pas

Les participants avec un avis défavorable ont indiqué que les prévisions commerciales ne sont pas des données d'entrée du PDP. Actuellement, les données des commandes clients dans l'horizon du PDP sont les données d'entrée de demande employées. Les participants avec un avis mitigé indiquent que les prévisions commerciales ne sont pas disponibles dans tous les secteurs pour l'horizon du PDP. Néanmoins, ils considèrent que des prévisions d'un horizon inférieur à celui du PIC devraient être considérées dans le PDP.

Les commentaires des participants favorables pour cette affirmation sont alignés avec les avis précédents. Les participants précisent que les données de commandes sont les données d'entrée exploitées dans les PDP.

ITEM 10 : Le PDP permet actuellement de simuler les variations capacitaires générées par l'absentéisme.

15 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 46 % d'avis défavorables, 24 % ne savent pas  
La majorité de participants s'est montrée défavorable à cette affirmation. Ils considèrent que le niveau de maturité actuel du PDP ne permet pas d'intégrer la simulation pour analyser les variations capacitaires engendrées par l'absentéisme.

Les participants avec un avis mitigé ont indiqué que le PDP permet actuellement d'anticiper des variations capacitaires associées aux congés. Cependant, les variations associées à d'autres causes d'absentéisme ne peuvent pas être considérées.

ITEM 30 : Le système ERP (Sage-X3) actuellement disponible permet de visualiser la charge-capacité dans l'horizon PDP.

15 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 62 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas  
Les avis majoritairement défavorables pour cette affirmation considèrent que dans l'ERP les postes de charge ne sont pas bien paramétrés. En plus, les postes actuels ne reflètent pas la réalité des lignes de production. Les participants avec un avis mitigé indiquent que les données de charge et de capacité de l'ERP ne sont pas à jour. Finalement, les participants avec un avis favorable considèrent que l'exploitation des données de l'ERP pour visualiser le rapport de charge-capacité dépend de la fiabilité de données.

ITEM 32 : Le système ERP (Sage-X3) actuellement disponible permettent de connaître le Lead Time critique/de calculer le plus long délai cumulé (ceci étant le plus long délai d'approvisionnement + le plus long délai de production).

54 % d'avis mitigés, 23 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
Aucun participant ne s'est montré favorable à cette affirmation. La plupart des participants sont mitigés par rapport au calcul du Lead time critique à partir de l'ERP. Ils indiquent qu'il y a des données disponibles pour obtenir la valeur du plus long délai cumulé, mais cette valeur n'est pas directement enregistrée dans l'ERP.

## Thématique- Prise de décisions PDP

ITEM 1 : Les propositions du PDP prennent actuellement en compte la disponibilité des matières premières.

69 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 15 % d'avis défavorables, 8 % ne savent pas

La plupart des participants se sont montrés favorables à cette affirmation. Ils ont précisé que les propositions du PDP considèrent la disponibilité théorique des matières premières. Les participants avec un avis défavorable ont indiqué que le PDP doit être la base de travail pour les responsables des approvisionnements et des achats.

ITEM 5 : Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la légitimité des décisions prises lors des réunions.

62 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 23 % d'avis défavorables, 7 % ne savent pas

La majorité des participants considère que le PDP assure la légitimité des décisions prises lors des réunions. Certains participants se sont montrés mitigés pour cette affirmation parce qu'ils considèrent que ceci n'est pas le seul objectif du PDP. Les participants avec un avis défavorable considèrent que les décisions des réunions PDP ne sont pas toujours respectées.

ITEM 2 : Les délais de traitement de commandes proposés aux clients considèrent le temps d'approvisionnement et le temps de production. Les délais de traitement de commandes proposés aux clients sont calculés sur la base du plus long délai cumulé (plus long délai d'approvisionnement + plus long délai de production).

54 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 8 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas

La plupart des participants considèrent que les délais de traitement de commandes sont calculés sur la base du plus long délai cumulé. Certains participants se sont montrés mitigés et défavorables pour cette affirmation. Ils considèrent qu'en plus de ces données il est essentiel de considérer les données des encours dans le calcul des délais de traitement de commandes proposés aux clients. En plus, ils ont évoqué une campagne lancée auprès des différents services (bureau d'études, approvisionnements, achats, méthodes et production) qui a comme objectif de respecter les lead time de chaque secteur.

ITEM 3 : La stabilité de la production est considérée comme une hypothèse dans le processus PDP actuel.

31 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 38 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas

La majorité des participants a indiqué que la production n'est pas considérée stable dans le processus PDP actuel. Ils ont indiqué que des aléas comme les rebuts, les non-conformités et des soucis d'industrialisation ne permettent pas de faire une telle hypothèse.

ITEM 4 : La stabilité de la production est régulièrement vérifiée dans le processus PDP actuel. 15 % d'avis favorables, 31 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
Le positionnement des participants pour cette affirmation est aligné avec les réponses de l'Item 3. Les participants ont indiqué que la production n'est pas considérée stable dans le PDP. En conséquence, ils sont plutôt défavorables et mitigés par le fait de vérifier la stabilité de la production pour le PDP.

## Thématique- Caractéristiques du Marché

ITEM 1 : Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) le carnet de commandes des clients est plein. 31 % d'avis favorables, 15 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables, 23 % ne savent pas  
La diversité d'avis par rapport cette affirmation est associée au secteur de fabrication dans lequel les participants travaillent. Les avis favorables proviennent des sites de production pour lesquels le carnet de commandes est plein dans un horizon d'environ 9 mois. Les avis mitigés et défavorables, sont associés à des sites de fabrication où le carnet de commandes est plein pour des horizons de 4 à 5 mois, de 6 mois et entre 7 et 8 mois. Uniquement les participants d'un de secteurs de production a indiqué avoir un horizon du PDP égal au Lead Time critique du produit fini. Pour cet horizon le carnet de commandes n'est pas toujours plein.

ITEM 2 : Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) la demande n'est pas caractérisée par de grandes variations.

31 % d'avis favorables, 7 % d'avis mitigés, 31 % d'avis défavorables, 31 % ne savent pas  
En cohérence avec les réponses de l'Item 1 de cette thématique, les avis des participants dépendent du secteur de production dans lequel ils travaillent. Les participants qui font partie de sites avec une demande qui fluctue peu ont donné un avis favorable par rapport cette affirmation. Similairement, les sites qui utilisent des commandes fermes pour les calculs du PDP ont indiqué ne pas avoir de grandes variations de la demande dans l'horizon du PDP. Les participants avec des avis mitigés et défavorables, ont indiqué que la demande peut avoir de grandes variations dans l'horizon du PDP. Dans ce cas, le PDP permet de planifier la charge en fonction de la capacité disponible.

## Thématique- Retard Commandes clients

ITEM 1 : Le suivi hebdomadaire de la quantité produite versus la quantité planifiée s'avère indispensable pour le processus PDP actuel.

77 % d'avis favorables, 8 % d'avis mitigés, 15 % ne savent pas

La majorité des participants est favorable à cette affirmation. Ils considèrent que le suivi hebdomadaire de la quantité produite par rapport la quantité planifiée est indispensable pour replanifier les quantités manquantes et communiquer les nouveaux délais. Cependant, ils ont indiqué que ce suivi est rarement effectué dans le processus PDP actuelle.

## Annexe 6 Matrices de résultats Second Tour

### Thématique- Caractéristiques du processus PDP

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
97	114	94	40	57	65	1
21 %	25 %	20 %	9 %	12 %	14 %	0 %

ID	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
1	Les données de charge-capacité du PDP doivent être les plus alignées possible avec les conditions en « temps réel » des ateliers de production.													
17	Le plan d'approvisionnement mis à jour fournit une base pour le processus décisionnel du PDP actuel.													
5	Les données du carnet de commandes clients dans l'horizon PDP sont actuellement employées telles que données d'entrée par le PDP.													
19	Dans le processus PDP actuelle, il existe une coopération efficace et active entre les départements production et Supply Chain.													
28	Le respect des délais de livraison promis aux clients est l'un des objectifs principaux du PDP.													
13	La diminution du retard est l'un des objectifs principaux du PDP actuel.													
36	Les outils customisés du type Excel constituent une bonne base pour soutenir le processus décisionnel du PDP.													
9	Les décisions prises lors des réunions du PDP sont issues de l'exploitation des données par le biais de l'ERP (Sage X3).													
11	L'objectif principal du PDP est actuellement de diminuer le retard de livraison des commandes clients existantes.													
14	L'optimisation de l'utilisation de la capacité disponible est l'un des objectifs principaux du PDP.													
27	Le PDP a actuellement comme objectif d'assurer la robustesse des plans proposés. <i>La robustesse est la capacité de maintenir l'efficacité dans un ensemble de tâches, de situations et de conditions.</i>													





## Thématique- Caractéristiques du Marché

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
4	4	3	6	2	7	0
15 %	15 %	12 %	23 %	8 %	27 %	0 %

ID	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
1	Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) le carnet de commandes des clients est plein.													
2	Dans l'horizon du PDP (environ 9 mois) la demande n'est pas caractérisée par de grandes variations.													

## Thématique- Retard Commandes clients

Je suis tout à fait d'accord	Je suis d'accord	Je suis mitigé	Je ne suis pas d'accord	Je ne suis pas du tout d'accord	Je ne sais pas	Je ne veux pas répondre
7	3	1	0	0	2	0
54 %	23 %	8 %	0 %	0 %	15 %	0 %

ID	Item	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
1	Le suivi hebdomadaire de la quantité produite versus la quantité planifiée s'avère indispensable pour le processus PDP actuel.													



**Estefania TOBON VALENCIA**



# **Contribution à la formalisation d'un processus PDP agile, dans le cadre de l'industrie 4.0**

## **Résumé**

Les PME (Petites et Moyennes Entreprises) manufacturières, représentants majeurs de l'industrie mondiale, font face aujourd'hui à des fortes pressions pour répondre dans des délais toujours plus courts aux besoins particuliers des clients avec des prix compétitifs. Dans cet environnement de concurrence accrue, la transformation de processus de planification de la production par l'exploitation des technologies 4.0 peut apporter des réponses à ces défis. Cependant, considérant le nombre des technologies proposées à l'ère du numérique, il n'est pas simple pour les PME de sélectionner les groupes technologiques le plus adaptés à leur contexte industriel et organisationnel ainsi que les activités sensibles d'être améliorées par le numérique. La planification d'un projet de transformation de processus par le numérique requiert une définition de la portée du 4.0 ainsi que des objectifs de performance à atteindre avec le projet. Toutefois, notre revue de la littérature montre que les PME manquent de modèles pour aborder la transformation numérique dans les processus de planification. En vue de cette problématique, cette thèse doctorale propose une approche de planification de la production à moyen terme 4.0, centré sur le processus Programme Directeur de Production (PDP), pour les PME manufacturières. Afin de répondre à nos objectifs, nous avons d'abord conduit une étude de prospective pour préciser le besoin industriel associé au PDP au sein d'un groupe des PME manufacturières. Cette étude a montré que les axes de transformation principaux se concentraient autour du processus et des outils de support pour la prise des décisions. Dans le but de rendre agile le processus PDP nous présentons une méthodologie de sélection des activités sensibles à être faites d'une nouvelle façon à partir de deux leviers d'amélioration, la surveillance et l'optimisation. Sur cette base nous proposons l'intégration des groupes technologiques 4.0 dans le PDP. Quant aux outils de support pour la prise des décisions, nous proposons deux approches d'optimisation pour le PDP adaptées à des contextes industriels d'assemblage sur commande, avec différentes lignes d'assemblage, divers goulets, plusieurs articles directeurs et fabrication principalement artisanale. Nous présentons également l'intégration de ces approches d'optimisation dans le processus PDP. Mots-clés : Planification de la production, Programme Directeur de Production (PDP), Industrie 4.0, Agilité, PME.

## **Résumé en anglais**

Manufacturing SMEs (Small and Medium-sized Enterprises), major actors of the global industry, are subjected to strong pressure from the market to respond in shorter delays to customized needs with competitive prices. The evolution of production planning activities through the 4.0 technologies can provide answers for facing these challenges. However, considering the large number of industry 4.0 technologies, it is not easy for SMEs to select the most adequate technologies for their industrial and organizational context and the most adequate activities that could enhance a digital improvement. Planning a digital transformation project requires the definition of the 4.0 scope as well as a clear vision of the performance objectives to be achieved. Nevertheless, our review of the scientific literature shows that SMEs lack models for carrying digital transformation in planning activities. This thesis proposes a 4.0 production planning approach, focused on the Master Production Schedule (MPS), for manufacturing SMEs. In order to reach our research goal, we conducted a prospective study to specify the industrial need of the MPS process within a group of manufacturing SMEs. This study revealed that the main levers of the transformation concerned the process and the tools for supporting decision-making. Regarding the process, we present a methodology for selecting the activities to be done in a new way based on two improvement levers, monitoring and optimization. On this basis, we propose the integration of the 4.0 technologies in the MPS. As for decision support tools, we propose two optimization approaches for the MPS in the context of SME with an assemble-to-order (ATO) strategy, multiple assembly lines, several bottlenecks, diverse master items and a mainly artisanal production process. We also present the integration of these optimization approaches in the MPS activities. Key words: Production Planning, MPS (Master Production Schedule), Industry 4.0, Agility, SME.