



HAL
open science

Proposition d'un cadre méthodologique adaptable pour l'évaluation de la performance d'un système de planification de la production : Application à Demand Driven MRP

Stéphanie Bayard

► **To cite this version:**

Stéphanie Bayard. Proposition d'un cadre méthodologique adaptable pour l'évaluation de la performance d'un système de planification de la production : Application à Demand Driven MRP. Sciences de l'ingénieur [physics]. Mines Saint-Etienne, 2023. Français. NNT : 2023EMSEM001 . tel-04096110

HAL Id: tel-04096110

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/tel-04096110>

Submitted on 24 May 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT

de Mines Saint-Etienne - Une école de l'IMT

Ecole Doctorale N°488
(Sciences, Ingénierie, Santé)

Spécialité de doctorat : Génie Industriel

Soutenue publiquement le 05 Janvier 2023 par :

Stéphanie Bayard

**Proposition d'un cadre méthodologique adaptable
pour l'évaluation de la performance d'un système
de planification de la production :
Application à Demand Driven MRP**

Devant un jury composé de :

Samir LAMOURI
Nathalie SAUER
Pierre CASTAGNA
Wahiba KHETTAF
Xavier DELORME,
Frédéric GRIMAUD

Professeur, Arts et Métiers Paris
Professeure, Université de Lorraine,
Professeur émérite, Université de Nantes
Maître de conférences, Mines Nancy
Professeur, Mines Saint-Etienne
Professeur, Mines Saint-Etienne

Rapporteur
Rapporteuse
Examineur
Examinatrice
Directeur de thèse
Co-directeur de thèse

Affidavit

Je soussignée, Stéphanie Bayard, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Xavier Delorme et Frédéric Grimaud, dans le respect des principes d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis dans sa globalité en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à St Etienne , le 15 mars 2023



Ce travail de thèse est une œuvre de l'esprit, protégée par le droit d'auteur, tel que prévu aux articles L111-1 du CPI et suivants disposant que « *L'auteur d'une œuvre de l'esprit jouit sur cette oeuvre, du seul fait de sa création, d'un droit de propriété incorporelle exclusif et opposable à tous. [...] »*

Il est rappelé que par exception au droit d'auteur, la loi française autorise l'utilisation d'une œuvre divulguée, sans autorisateur de son auteur, suivant les conditions définies dans l'article L122-5 du CPI disposant que « *Lorsque l'œuvre a été divulguée, l'auteur ne peut interdire [...] la représentation ou la reproduction d'extraits d'œuvres, [...] sous réserve que soient indiqués clairement le nom de l'auteur et la source [...] les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées [...] »*

Remerciements

« Qui Veut Peut ! »...

De la volonté il m'en aura fallu beaucoup mais sans le soutien et l'aide d'un grand nombre de personnes, ma volonté seule n'aurait pas suffi. Alors un grand merci à tous ceux qui de près ou de loin m'ont accompagnée dans ce projet, un peu fou à mi-carrière, et m'ont permis d'aller jusqu'au bout.

Je commencerai par remercier l'Ecole des Mines de Saint Etienne , l'Institut Fayol et le LIMOS d'avoir accepté de me suivre dans ce projet. Des solutions ont toujours été trouvées, malgré les difficultés administratives, pour me permettre de le réaliser. Un grand merci également à mes collègues de l'ENISE qui m'ont soutenue dans ce projet. Mention spéciale pour Nicolas, Julien et Audrey pour leur aide précieuse.

Je remercie également l'association SPACE Aero d'avoir soutenu ce projet, contribué à son financement et ouvert les portes du monde aéronautique. Une dédicace particulière à Jean Desproges-Gotteron pour son enthousiasme, l'organisation des visites et événements ainsi que son accompagnement qui ont largement contribué à l'enrichissement de mon étude.

J'adresse également mes plus sincères remerciements à mes rapporteurs, les professeurs Nathalie Sauer et Samir Lamouri pour avoir accepté d'évaluer mon travail malgré des contraintes temporelles fortes. Merci également au professeur Pierre Castagna d'avoir accepté de présider mon jury et au docteur Wahiba Kettaf d'y avoir participé. Je vous suis reconnaissante à tous les 4 pour les échanges riches qui me permettront, j'en suis sûre, de poursuivre mon travail.

J'ai passé 4 belles années au sein de l'Institut Fayol et plus particulièrement au sein du département GMI. Merci notamment à Mireille, Paolo, Damien, Anis, Ksneyia, Xavier B, Rodolphe, Audrey, Eric et Christine. J'ai apprécié les échanges avec chacun d'entre vous et particulièrement nos pauses café ou déjeuner dans la bonne humeur. Merci aussi plus largement aux autres membres de l'Institut notamment à Marie-Line ainsi qu'à Nilou et Jean-François pour leur support technique.

Je garde les meilleurs pour la fin. Je n'aurais pas pu avoir de meilleurs encadrants que Frédéric et Xavier tant du point de vue scientifique que personnel. Ils ont su me guider et m'accompagner dans cette folle aventure de laquelle je ressors grandie et pleine de projets. Ils ont toujours été présents et à l'écoute face à mes nombreux questionnements. Leur complémentarité a été une source d'enrichissement pour moi. Je les remercie profondément pour leur investissement et leur soutien indéfectible.

En dehors du cadre professionnel, ma plus grande reconnaissance va à ma famille et ma belle-famille qui m'ont soutenue tout au long de ce projet. J'ai la chance d'être très bien entourée et d'avoir eu l'aide logistique nécessaire pour me concentrer sur mon travail. Ma réussite est aussi la votre ! Mention spéciale pour ma team de choc relecture.

Enfin, je dédicace ce travail à Anthony, Arthur, Louise et Jean. Merci pour votre amour, votre patience et votre soutien. J'espère que j'aurai été un exemple pour vous de ce qu'on peut accomplir avec « un peu de volonté ».

Table des matières

TABLE DES MATIÈRES	V
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I UN CONTEXTE INDUSTRIEL NÉCESSITANT DE NOUVELLES APPROCHES	5
I-1 UN CONTEXTE EN ÉVOLUTION : VUCA	6
I-2 DÉFINITION DE L'ENTREPRISE INDUSTRIELLE	7
I-2.1 Approche systémique	7
I-2.2 Modèle OID et niveau de décision	8
I-2.3 Focus sur le système de production	9
I-2.4 Performance et entreprise industrielle	12
I-3 SYSTÈME DE PRODUCTION ET VUCA	15
I-3.1 Évolution de la gestion de production face à l'environnement	15
I-3.2 QCD et VUCA	17
I-3.3 Des solutions à court terme parfois contre productives	18
CONCLUSION	20
CHAPITRE II ÉTAT DE L'ART	21
II-1 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE	22
II-1.1 Historique	22
II-1.2 Définition des systèmes d'évaluation de la performance	22
II-1.3 PMS et entreprise industrielle	24
II-2 GESTION DE L'INCERTITUDE DANS LE SYSTÈME DE PRODUCTION	26
II-2.1 Les approches stratégiques : adapter le système physique de production	26
II-2.2 Les approches tactiques : Intégrer l'incertitude	27
II-2.3 Les approches opérationnelles : la gestion de la variabilité	33
II-3 LE SYSTÈME DE PILOTAGE DE PRODUCTION : PRODUCTION PLANNING AND CONTROL SYSTEMS (PPC)	35
II-3.1 Définitions et périmètre	36
II-3.2 Principaux PPC	38
II-3.3 Adapter le PPC au contexte	46
CONCLUSION	52
CHAPITRE III APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	53
III-1 D'UN RAPPORT D'ANALYSE DES PPC AU CŒUR DE LA MÉTHODOLOGIE	55
III-1.1 Étude du périmètre fonctionnel	57
III-1.2 Analyse des principales caractéristiques	60
III-1.3 Analyse détaillée des éléments constitutifs du PPC	63
III-1.4 Évaluation de la performance quantitative	65
III-1.5 Analyse de la performance qualitative du PPC	67
III-1.6 Traçabilité de l'étude	69
III-1.7 Synthèse de l'analyse	69
III-2 CADRE MÉTHODOLOGIQUE POUR LA CONSTRUCTION DU RAPPORT D'ANALYSE	71
III-2.1 Présentation du cadre général	71
III-2.2 Articulation Phases-éléments du cadre méthodologique	73
III-2.3 P0-caractérisation et ses interfaces	74
III-2.4 P1-Etude qualitative	75

III-2.5 P2-Etude quantitative	76
III-2.6 Un cadre méthodologique adaptable	77
III-3 DÉTAILS MÉTHODOLOGIQUES DE LA PHASE P0-CARACTÉRISATION	80
III-3.1 P0-1 Appropriation des concepts	80
III-3.2 P0-2 État de l'art	80
CONCLUSION	83
CHAPITRE IV ÉTUDE QUALITATIVE	85
IV-1 STRUCTURATION DES THÉMATIQUES LIÉES AUX PPC	86
IV-2 LES DIFFÉRENTES SOURCES D'INFORMATIONS MOBILISÉES	88
IV-3 PROPOSITION D'UNE GRILLE « THÉMATIQUES PPC PAR SOURCES »	92
IV-4 LES RÉSULTATS DE LA PHASE P1-ÉTUDE QUALITATIVE	94
IV-4.1 Base de données pour la synthèse des cas industriels	94
IV-4.2 Contributions aux livrables du rapport d'analyse	95
IV-4.3 Contribution aux entrées de P2-étude quantitative via interface P1 ► P2	96
CONCLUSION	97
CHAPITRE V ÉTUDE QUANTITATIVE	99
V-1 UNE VISION SYSTÉMIQUE COMME CADRE DE MODÉLISATION	101
V-1.1 Les PPC pilotes des systèmes productifs comme objet d'étude	101
V-1.2 Vision générale du modèle	102
V-1.3 Le cadre expérimental	108
V-2 LE SIMULATEUR	109
V-2.1 Recours à la simulation à événements discrets (DES)	109
V-2.2 Architecture générale du simulateur	110
V-2.3 Le système de gestion de base de données : cœur du PPC	111
V-2.4 Le simulateur à événements discrets comme joueur	114
V-3 INTÉGRATION DU MODÈLE DE SIMULATION DANS LE CADRE MÉTHODOLOGIQUE	117
V-3.1 Les entrées	118
V-3.2 Les sorties	119
CONCLUSION	121
CHAPITRE VI APPLICATION DU CADRE MÉTHODOLOGIQUE POUR L'ÉVALUATION DE DDMRP	123
VI-1 ILLUSTRATION DE P0 : CARACTÉRISATION DE DDMRP	127
VI-1.1 Sous-phase P0-1 Appropriation des concepts	127
VI-1.2 Sous-phase P0-2 État de l'art : faire émerger les questionnements	133
VI-1.3 Exemple de contributions de P0 aux livrables	138
VI-1.4 Conclusion de la phase de caractérisation de DDMRP	143
VI-2 ILLUSTRATION PHASE P1-ÉTUDE QUALITATIVE	143
VI-2.1 Exemple d'itération P1-5 Survey 88 études de cas	144
VI-2.2 Exemples de contribution de P1-5 aux livrables	145
VI-3 ILLUSTRATION PHASE P2-ÉTUDE QUANTITATIVE	150
VI-3.1 P2-9 POC Seuil de pic	150
VI-3.2 Exemple de contribution de P2-9 aux livrables : participation aux analyses de D3	154
VI-4 ILLUSTRATION DE L'UTILISATION ITÉRATIVE DU CADRE MÉTHODOLOGIQUE : LE CAS DU PLACEMENT DE BUFFER	155
VI-4.1 P0-1 appropriation des concepts : émergence de la problématique	156
VI-4.2 P1-1 Entretiens ouverts : des heuristiques pertinentes	156
VI-4.3 P2-2 Étude de cas industriels : des résultats contre-intuitifs	156
VI-4.4 P1-3 Entretiens semi-directifs : un éclairage indispensable	157
VI-4.5 P2-5 Impact du Placement de buffer : valider les hypothèses	157
VI-5 D6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR DDMRP	161

VI-5.1 État final D4 Analyse des indicateurs	161
VI-5.2 État final D5 Analyse Bénéfices/Risques	162
VI-5.3 Recommandations pour l'utilisation de DDMRP	163
VI-5.4 Pistes de réflexion	164
CONCLUSION	166
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	<u>169</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>175</u>
<u>LISTE DES ANNEXES</u>	<u>187</u>

Table des figures

Figure I-1 Représentation systémique d'une entreprise industrielle adaptée de Belmahdi (1995).....	8
Figure I-2 Typologie des décisions d'après Ansoff (1968)	9
Figure I-3 Couplage vision systémique et OID du système de production et de son environnement.....	10
Figure I-4 Approche processus du système de production adaptée de Belmahdi (1995).....	12
Figure I-5 Évolution des systèmes de production d'après Koren 2010	16
Figure I-6 : La propagation de l'effet coup de fouet au sein de la supply chain	19
Figure II-1 Version simplifiée du processus de modélisation d'après (Sargent, 2010)	29
Figure II-2 PPC Schéma du PPC selon (Anil Kumar and Suresh, 2008)	37
Figure II-3 Manufacturing Planning and Control system d'après Jacobs et al., (2011) et (Berry and Hill, 1992)	37
Figure II-4 Schéma global de la démarche MRP2.....	39
Figure II-5 Représentation d'un système Kanban simplifié	40
Figure II-6 Représentation d'un système Conwip source conwip.com	41
Figure II-7 Boucle POLCA d'après Suri 2010	42
Figure II-8 Matrice de sélection des PPC alternatifs (Stevenson et al., 2005)	49
Figure II-9 Lien entre les méthodes de planification et les types de process (Tenhiälä, 2011)	49
Figure II-10 Manufacturing classifications: relationships with production control systems (Porter et al., 1999)	50
Figure III-1 Représentation de la philosophie général du cadre méthodologique proposé.....	55
Figure III-2 Structure globale du rapport d'analyse.....	56
Figure III-3 Exemple de la structure générale des livrables D1 à D5	57
Figure III-4 Proposition d'une vision du périmètre global du PPC.....	59
Figure III-5 Structure globale de D6 Conclusions et recommandations	71
Figure III-6 Schéma global du cadre méthodologique proposé	72
Figure III-7 Cadre général avec intégration des interfaces P0►P1 et P0►P2.....	75
Figure III-8 Cadre général et ensemble des interfaces.....	78
Figure V-1 Le modèle de simulation adapté de Zeigler et al., 2019	101
Figure V-2 Représentation du périmètre retenu pour l'étude simulatoire	102
Figure V-3 Représentation systémique du modèle	103
Figure V-4 Architecture globale du simulateur	111
Figure V-5 Extrait du SGBDD, données de base de la table « base articles »	112
Figure V-6 Vision globale du modèle Arena	115
Figure V-7 Représentation des macro processus DES.....	117

Figure V-8 Interactions modèle de simulation et cadre méthodologique proposé	118
Figure VI-1 Les étapes de la méthode DDMRP d'après (Ptak and Smith, 2011).....	127
Figure VI-2 Le dimensionnement des buffers d'après Ptak et Smith 2016	128
Figure VI-3 Exemple d'ajustement planifié de buffer d'après Ptak et Smith 2011.....	130
Figure VI-4 Étapes de la revue de littérature systématique appliquée à DDMRP	133
Figure VI-5 Proposition d'une vision de la méthode DDAE	139
Figure VI-6 Instanciation du modèle de simulation pour P2-9.....	151
Figure VI-7 Comparatifs des seuils et des ordres générés pour P2-9.....	153
Figure VI-8 Nomenclature de FPB	157
Figure VI-9 Extrait des résultats de P-5 Placement des buffers	160

Liste des tableaux

Tableau I-1 Exemples d'interactions processus du système de production/triptyque QCD	15
Tableau I-2 Exemples d'impacts de l'environnement VUCA sur le tryptique QCD.....	17
Tableau II-1 Principaux PMS et caractéristiques	24
Tableau II-2 Exemple de lien décision du système productif, KPI industriels et performance globale	25
Tableau II-3 Tableau des 13 PPC créés depuis les années 2000 d'après (Bagni et al., 2021).....	43
Tableau II-4 Grille de répartition des modes de production par type.....	45
Tableau II-5 Synthèse types d'environnement productif vs PPC utilisables.....	50
Tableau III-1 Les types d'études selon Robson et McCartan (2016)	54
Tableau III-2 D1 Exemple de périmètre fonctionnel du PPC réalisé pour MRP2.....	60
Tableau III-3 D2 Grille d'analyse des caractéristiques.....	63
Tableau III-4 Exemple D3 Synthèse des « Éléments constitutifs » pour MRP2	65
Tableau III-5 D4 Analyse des indicateurs.....	67
Tableau III-6 D5 Analyses Bénéfices Risques.....	68
Tableau III-7 D5 Extrait Analyse Bénéfices/Risques pour MRP2.....	68
Tableau III-8 Structure du livrable D0 Structuration de l'étude	69
Tableau III-9 Exemple de contribution attendue des Phases aux livrables	73
Tableau III-10 Contributions Phase caractérisation et livrables	74
Tableau III-11 Contribution de P1-étude qualitative aux livrables	76
Tableau III-12 Contribution de P2-étude quantitative aux livrables.....	77
Tableau III-13 Exemple des contributions possibles entre phases et livrables	79
Tableau III-14 Proposition de tableau de recensement de la littérature PPC	81
Tableau IV-1 Typologie des sources de la phase P1	88
Tableau IV-2 Grille thématiques PPC par sources	92
Tableau IV-3 Liens thématiques de P1-étude qualitative vs livrables	95
Tableau V-1 Valeurs des paramètres de volume.....	111
Tableau V-2 Extrait du tableau récapitulatif des ordres issus des processus PPC du SGBDD.....	114
Tableau VI-1 D0 Structuration de l'Étude cas de DDMRP	125
Tableau VI-2 Plage de choix des coefficients de délai et de variabilité d'après Ptak et Smith (2019).....	129
Tableau VI-3 Exemple de procédure de calcul des besoins avec DDMRP	131
Tableau VI-4 Publications DDMRP par thématiques	134
Tableau VI-5 Publications selon la méthodologie de recherche	137
Tableau VI-6 D1 Périmètre décisionnel DDMRP	138

Tableau VI-7 D2 Grille des caractéristiques établies pour DDMRP	140
Tableau VI-8 D4 analyse des indicateurs DDMRP suite à P0	142
Tableau VI-9 Base de données des cas industriels d'utilisation de DDMRP	144
Tableau VI-10 Exemple d'impact de l'itération P1-5 sur D2.....	146
Tableau VI-11 Répartition des cas industriels par taille	146
Tableau VI-12 Répartition des cas d'implantation des cas DDMRP par secteur d'activité.....	147
Tableau VI-13 Répartition des cas DDMRP selon le mode de réponse à la demande.....	148
Tableau VI-14 Répartition des cas DDMRP selon le type de process	148
Tableau VI-15 D4 Analyse des indicateurs à l'issue de P1-5.....	149
Tableau VI-16 Répartition des cas concernant le niveau de stock	150
Tableau VI-17 Principales hypothèses du modèle appliqué à DDMRP.....	151
Tableau VI-18 Zones du buffer cas P2-9.....	153
Tableau VI-19 Modalités du plan d'expériences	153
Tableau VI-20 Résultats de P2-9	153
Tableau VI-21 D3 synthèse des éléments constitutifs de DDMRP	154
Tableau VI-22 Extrait de D0 focalisé sur la question du placement des buffers	155
Tableau VI-23 Principales données articles du cas P2-5 Impact du placement de buffer.....	158
Tableau VI-24 Coefficients de délai pour P2-5	158
Tableau VI-25 Coefficients de variabilité de P2-5	158
Tableau VI-26 Placement des buffers	159
Tableau VI-27 Modalités de variabilité.....	159
Tableau VI-28 D4 analyse des indicateurs de DDMRP	161
Tableau VI-29 D5-Analyse bénéfiques/risques pour DDMRP	162

Introduction

Depuis plus de 20 ans, le contexte économique mondial est particulièrement instable. Cela génère de nouvelles contraintes, et l'accentuation de celles qui préexistaient, pour l'ensemble des acteurs parmi lesquels les entreprises industrielles. Les rapports de force entre pays évoluent avec la montée en puissance de nouvelles économies (Brésil, Inde, Afrique du Sud, Indonésie...) qui modifient les réseaux mondiaux de production et de distribution. L'innovation technologique, qui est facteur de compétitivité, conduit à une accélération de l'obsolescence des produits accentuant la pression dans le renouvellement des produits. Les consommateurs sont souvent plus exigeants, notamment en termes de délais et de coûts. Ils cherchent des produits différenciés conduisant à une hyper-segmentation de nombreux marchés et qui bousculent les organisations productives... Cet environnement turbulent est souvent qualifié de VUCA (Volatil, Uncertain, Complex and Ambiguous). Cet acronyme regroupe, à lui seul, un ensemble de contraintes fortes auxquelles font face les entreprises industrielles et qui déstabilisent leur système de production et d'approvisionnements. Si le phénomène s'est accentué ces deux dernières années notamment à cause de la crise Covid, des tensions géopolitiques et de la crise climatique, la tendance est néanmoins présente depuis des années conduisant les entreprises à faire évoluer leurs méthodes pour résister aux incertitudes du contexte et préserver leurs performances.

Au niveau des entreprises industrielles, il existe plusieurs types de solutions qui s'appliquent aux différents systèmes qui les composent. Ainsi, le système commercial peut chercher une adaptation continue à la demande en proposant des nouveaux produits, il peut également adapter la communication pour être au plus proches des attentes du marché. Le système administratif est parfois réorganisé pour offrir de la flexibilité aux organisations en décentralisant certaines fonctions ou centres de décisions... Parmi les systèmes des entreprises industrielles, le système de production doit lui aussi être adapté pour gagner en réactivité et en flexibilité. Comme énoncé par (Koren, 2010), historiquement, face aux mutations du contexte économique et notamment à la nature de la demande (quantité et diversité), les méthodes déployées dans le domaine des systèmes de production ont évolué passant, par exemple, de la production de masse à la personnalisation. Cependant, certaines adaptations du système productif ne sont pas toujours très efficaces, voire augmentent les conséquences de l'incertitude. Les décideurs sont à la recherche de solutions.

Différentes alternatives sont possibles mais l'adaptation du système de pilotage de la production offre une approche attractive car potentiellement intégrée à tous les niveaux décisionnels du système productif. Il regroupe les processus de planification et de contrôle de la production (Production Planning and Control system ou PPC) qui ont pour but de satisfaire la demande en maximisant les autres axes de la performance. Selon (Bagni et al., 2021), depuis début 1999, l'accélération de la pression a conduit à la création de **13 nouveaux systèmes de pilotage de production ce qui témoigne de l'intérêt de cette approche face à l'incertitude de l'environnement VUCA**. Les auteurs établissent un comparatif conceptuel et font état d'un manque d'information concernant les mises en place réelle et les résultats obtenus. Nous constatons par ailleurs, que peu d'informations sont données quant à leur contexte d'utilisation. Or, il est établi que les PPC doivent être adaptés au contexte industriel dans lequel ils sont utilisés. Cependant, l'étude des principaux PPC conduit à la conclusion que certains PPC sont utilisables dans différents contextes industriels. Une telle analyse laisse supposer qu'une évaluation plus fine est nécessaire pour en choisir un. Il serait donc intéressant de pouvoir les situer afin de comprendre leur intérêt et évaluer leur performance. Il paraît donc essentiel de pouvoir évaluer leur performance de façon globale et d'en offrir une vision la plus complète possible en intégrant à la fois les retours d'expériences des utilisateurs et une analyse objective de leur comportement. **Cependant, il n'existe pas de modèle permettant une telle évaluation des PPC permettant de les comprendre, positionner et les évaluer grâce à la réalisation d'une analyse globale.**

Au travers de ce travail, nous proposons donc un cadre méthodologique répondant à ce besoin et permettant de conduire la démarche d'exploration de la performance d'un PPC. La proposition **combine approches qualitative et quantitative** permettant une investigation aussi **complète et objective** que possible de la performance globale d'un PPC. La proposition qui est faite comporte le cadre méthodologique lui-même, mais également la méthodologie et les outils permettant de l'utiliser. Elle s'appuie sur **3 phases** et conduit à la rédaction d'un **rapport d'analyse comprenant 7 livrables**. Chaque phase joue son propre rôle et alimente les livrables ainsi que les interfaces (espace de communication entre les phases). **La phase P0-caractérisation** conduit à la **compréhension de base** du PPC étudié et s'appuie principalement sur l'appropriation des concepts et une revue de littérature systématique. **La phase P1-étude qualitative** a pour objectif principal de **capitaliser les retours d'expériences** et repose sur une étude croisée de sources documentaires et terrain. La phase **P2-étude quantitative** exploite, quant à elle, un **modèle de simulation à événements discrets** permettant la réalisation de plans d'expériences. Elle a pour objectif de tester des hypothèses issues des autres phases, d'analyser la performance et d'étudier le comportement dynamique du PPC pour en améliorer la compréhension.

Le **cadre méthodologique est itératif**, c'est-à-dire que les résultats présentés sont généralement corroborés par des allers-retours entre les phases. Afin de permettre les échanges entre phases, l'utilisation d'**interfaces** est formalisée au sein du cadre. Il est également **adaptable** en fonction des objectifs fixés pour l'étude et du type de PPC étudié (largement diffusé ou récent). Ainsi il est possible d'utiliser ou non toutes les phases. Le cadre conduit à la réalisation du rapport d'analyse incluant **7 livrables**. Parmi eux, 5 correspondent chacun à une thématique spécifique relevant de l'étude de la performance des PPC (périmètre, caractéristiques, éléments constitutifs, analyse des indicateurs clés de performance, analyse bénéfices-risques). Ils sont incrémentés par les itérations. Les 2 autres livrables jouent un rôle de synthèse : le 1^{er} est le préalable permettant la traçabilité de l'étude tandis que le 2nd est la synthèse à date de l'évaluation de la performance issue de l'ensemble des analyses.

L'utilisation de ce cadre méthodologique est **illustrée avec l'exemple du Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP)**, approche proposée par Ptak et Smith en 2011. À travers cette approche, les auteurs ambitionnent de **s'affranchir de la variabilité liée au contexte VUCA** en basant la production sur la consommation réelle et non sur les prévisions et en utilisant des stocks de découplage, appelés buffers, qui doivent limiter la propagation de la variabilité en amont. Ce nouveau PPC donne lieu à des publications de **résultats prometteurs** tant dans le monde industriel que dans le monde académique. Cependant, si les principes de base semblent simples, la **compréhension des mécanismes de la méthode est limitée**. De même, la **nature et les conditions de sa performance ne sont que peu explicitées**. Enfin, comme pour beaucoup de PPC, les évaluations disponibles sont limitées à la vision quantitative. L'utilisation du cadre méthodologique permettra d'apporter des réponses à ces différentes questions.

En résumé, l'objectif de ce mémoire est donc de présenter le cadre méthodologique permettant l'évaluation globale de la performance des PPC et d'en démontrer l'utilité en l'appliquant à un cas concret. Il est composé de 6 chapitres.

Dans le 1^{er} chapitre, nous nous attacherons, dans un 1^{er} temps, à caractériser le nouveau contexte économique conduisant au renouvellement des approches de pilotage de production. Nous définirons ensuite l'entreprise industrielle en tant que système complexe et présenterons les processus relevant du sous-système de production. Nous déterminerons ensuite quels processus de l'entreprise sont impactés par le contexte VUCA et quelles réponses globales peuvent être apportées.

Le 2^{ème} chapitre sera dédié à l'état de l'art. Nous reviendrons sur la mesure de la performance puis nous présenterons les différentes approches industrielles permettant aux entreprises de s'adapter dans ce contexte selon le niveau décisionnel sur lequel elles agissent. Nous focaliserons ensuite sur les principaux Production Planning and Control Systems (PPC) ainsi que sur DDMRP, et sur les critères de choix permettant de déterminer leur pertinence en fonction du contexte industriel.

Le 3^{ème} chapitre sera consacré à la présentation générale du cadre méthodologique proposé. Dans un premier temps, le rapport d'analyse et ses 7 livrables seront présentés pour situer les principes fondateurs

de la méthodologie. Les trois Phases, leurs interfaces et l'utilisation du cadre seront ensuite présentées succinctement pour identifier le rôle de chacune et comprendre le fonctionnement global. La 1^{ère} phase du cadre sera détaillée au sein de ce chapitre, car elle en est le point d'entrée.

Les chapitres 4 et 5 seront respectivement consacrés à la présentation détaillée des 2 autres phases à savoir les études qualitative et quantitative. Le chapitre 4 permettra notamment de préciser l'ensemble des sources mobilisables pour le recueil des retours d'expériences et de présenter les outils de synthèse développés pour permettre leur analyse. Le chapitre 5, quant à lui, sera dédié à la présentation du modèle de simulation créé pour permettre la réalisation de différents types de plans d'expériences. Le cadre méthodologique se voulant adaptable, nous avons développé un modèle de simulation paramétrable dont le simulateur est architecturé autour de l'utilisation des deux familles de logiciels : un système de gestion de base de données et un logiciel de simulation à événements discrets. L'architecture générale du modèle de simulation ainsi que les rôles et détails de chacun des 2 outils développés seront précisés dans ce chapitre.

Le chapitre 6 est une illustration de l'utilisation du cadre méthodologique appliqué à l'évaluation globale de la performance de DDMRP, le rapport d'analyse complet étant disponible en [Annexe 4](#). Nous présenterons les principaux éléments de PO-caractérisation pour permettre la compréhension des concepts sous-jacents de DDMRP. Nous illustrerons ensuite les phase P1-étude qualitative et P2-étude quantitative par des exemples d'itérations réalisées. Nous démontrerons ensuite l'utilisation itérative du cadre méthodologique et l'intérêt des allers-retours entre les phases à travers un exemple concret portant sur le placement des buffers. Nous concluons ce chapitre par les points saillants du livrable D6 Conclusions et Recommandations.

Nous achèverons ce mémoire par une conclusion permettant de faire le point sur les apports et limitations de ce travail ainsi que sur les perspectives qui en découlent.

L'articulation générale de ce mémoire peut être résumée à travers la [Figure 1](#). Il est décomposé en 3 blocs principaux : la justification et le positionnement de la recherche (chapitre 1 et 2), la proposition méthodologique (chapitres 3, 4 et 5) et une illustration de l'utilisation de la méthodologie proposée (chapitre 6).

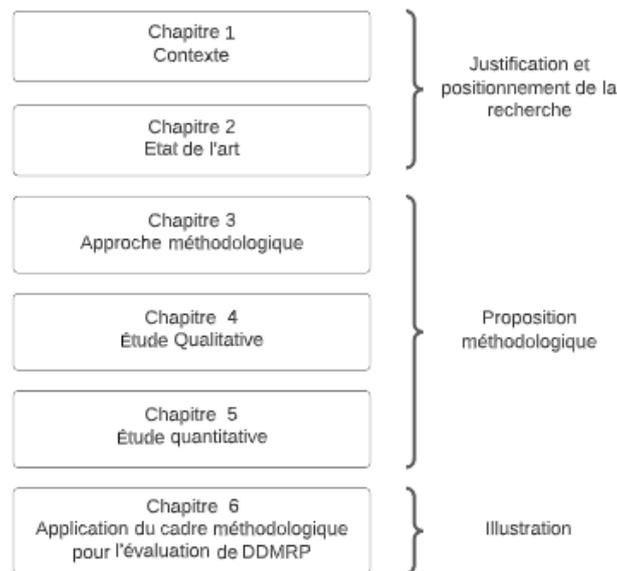


Figure 1 Articulation générale du mémoire



Chapitre I

Un contexte industriel nécessitant de nouvelles approches

<u>I-1</u>	<u>UN CONTEXTE EN ÉVOLUTION : VUCA</u>	6
<u>I-2</u>	<u>DÉFINITION DE L'ENTREPRISE INDUSTRIELLE</u>	7
	I-2.1 Approche systémique	7
	I-2.2 Modèle OID et niveau de décision	8
	I-2.3 Focus sur le système de production	9
	I-2.4 Performance et entreprise industrielle	12
<u>I-3</u>	<u>SYSTÈME DE PRODUCTION ET VUCA</u>	15
	I-3.1 Évolution de la gestion de production face à l'environnement	15
	I-3.2 QCD et VUCA	17
	I-3.3 Des solutions à court terme parfois contre productives	18
	<u>CONCLUSION</u>	20

RÉSUMÉ

Le contexte économique général a toujours eu un impact majeur sur l'organisation des entreprises et particulièrement sur les entreprises industrielles qui doivent être capables de répondre à la demande du marché en tenant compte de l'ensemble des contraintes que l'environnement fait peser sur elles.

L'enjeu de ce chapitre est de comprendre ce nouvel environnement et les contraintes particulières qu'il génère pour les entreprises industrielles. Nous définirons d'abord précisément le contexte VUCA, puis l'entreprise en tant que système complexe, nous étudierons ensuite son système productif avant de préciser les impacts potentiels de l'environnement VUCA sur sa performance.

I-1 Un contexte en évolution : VUCA

Depuis plusieurs années, les entreprises sont soumises à des pressions liées à l'évolution de l'environnement économique. Les événements liés à la crise COVID de ces derniers mois ne sont que la confirmation d'une tendance de fond déjà engagée depuis plusieurs années. Le contexte industriel évolue de plus en plus rapidement et de façon imprévisible. Celui-ci est souvent caractérisé de VUCA (Volatil, Uncertain, Complex and Ambiguous). Ce terme a été utilisé dès 1987 dans le nouveau programme d'enseignement de l'armée américaine pour faire face aux nouveaux enjeux internationaux. D'après l'U.S. Army Heritage and Education Center, l'intégration de ce terme dans les programmes est directement liée au Goldwater-Nichols Act of 1986 qui a entraîné la réorganisation des forces armées américaines pour faire face au contexte international inédit de l'époque qui nécessitait de nouvelles approches militaires.

Aujourd'hui cet acronyme est très largement utilisé dans le monde des entreprises, car il permet de définir les caractéristiques principales de l'environnement des entreprises et résume en quelques mots les grandes difficultés qu'elles rencontrent :

- Volatilité : l'ampleur des variations des données considérées par les entreprises, comme la demande ou encore le prix des matières, est de plus en plus importante. Il devient extrêmement difficile de prédire les évolutions des marchés et donc d'établir des modèles prévisionnels fiables qui permettent d'assurer l'activité industrielle.
- Incertitude (Uncertainty) : l'apparition de phénomènes inattendus et donc difficilement prévisibles comme la crise sanitaire, l'impact climatique sur les sources d'approvisionnement ou encore l'instabilité géopolitique. Ces différents phénomènes sont fortement perturbants pour l'ensemble des acteurs économiques et sont particulièrement impactants pour les industriels qui voient leurs systèmes productifs et logistiques fortement déstabilisés.
- Complexité (endogène et exogène) : la première réside dans la complexification des structures et des organisations, des produits et l'émergence de nouvelles technologies qui produisent des quantités colossales de données finalement difficiles à exploiter. La complexité exogène est notamment liée à la mondialisation et à la multiplication des acteurs en présence, des réseaux de production et de distribution. Le niveau de complexité ne permet plus d'avoir une vision claire de la situation, il est extrêmement difficile de définir précisément les causes d'un phénomène ou de prévoir les conséquences d'une action.
- Ambiguïté : pour les entreprises l'ambiguïté relève d'une part des nouveaux modèles de relations concurrentielles : les entreprises sortent de la logique d'affrontement pur pour se diriger vers des logiques plus coopératives avec leurs concurrents. Les modèles économiques traditionnels basés sur la concurrence sont remis en cause. L'ambiguïté réside, d'autre part, dans l'interprétation des phénomènes auxquels elles font face ce qui rend la prise de décision très délicate.

Face à cet environnement VUCA, l'ensemble des acteurs économiques doivent s'adapter pour faire face à de nouveaux défis. À un niveau macroscopique, c'est l'ensemble de la société qui évolue. Cependant, parmi l'ensemble des acteurs, les entreprises industrielles sont particulièrement touchées par cet environnement économique instable et doivent faire face à de nouveaux défis. Cet environnement rend plus difficile la prise de décision d'une part parce que les modèles existants sont parfois « caduques » mais également parce que l'évaluation des conséquences d'un événement n'est plus aussi évidente qu'auparavant. Cela conduit à un horizon décisionnel réduit avec une focalisation sur les objectifs à court terme et à une nécessité d'adapter les modèles de décision et les systèmes de gestion pour faire face à l'ensemble de ces incertitudes générées par cet environnement.

Il est donc primordial de définir et comprendre les entreprises industrielles pour comprendre les impacts de l'environnement VUCA sur leur performance. Les approches systémiques, d'une part, et par les processus, d'autre part, fournissent un cadre approprié à cette description.

I-2 Définition de l'entreprise industrielle

D'après l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE), l'entreprise est « *une unité économique, juridiquement autonome dont la fonction principale est de produire des biens ou des services pour le marché* ». La notion d'entreprise industrielle limite cette définition à celles qui ont pour vocation de fabriquer des produits, et non des services, afin de les vendre à leurs clients particuliers ou professionnels pour satisfaire leurs besoins tant quantitativement que qualitativement. Elles mobilisent pour cela un ensemble de moyens de production (hommes, machines) qu'elles doivent organiser de façon efficace (répondre aux besoins) et efficiente (en optimisant l'utilisation des moyens de production pour en diminuer le coût).

D'après la définition de l'INSEE, le premier objectif de l'entreprise est de répondre à la demande client. Pour remplir cette « mission », **l'entreprise industrielle doit mettre en œuvre une organisation qui peut être décrite et analysée de différentes manières**. Elle peut être décrite d'un point de vue purement économique c'est-à-dire un acteur qui crée de la valeur ajoutée, juridique en tant qu'entité, social, organisationnel, technologique... Cette diversité des approches nous renseigne sur la complexité de l'entreprise. Dès lors, **l'approche systémique paraît pertinente pour la décrire**.

I-2.1 Approche systémique

L'approche systémique a été initialement développée à partir des années 1920 par (Bertalanffy, 2012) dans le domaine de la biologie et s'oppose à l'approche analytique qui voudrait qu'un tout se résume à la somme de ses parties. Dans cette vision analytique, il serait relativement « simple » de prévoir le fonctionnement d'un système en décomposant et analysant séparément les différents éléments. Cependant, cette vision écarte toute influence des interactions entre les éléments ce qui est peu représentatif de la réalité d'un certain nombre de systèmes. D'après Lugan, (2009), si l'approche analytique a été indispensable pour appréhender les phénomènes de base, elle est insuffisante pour décrire les systèmes complexes. L'approche systémique ouvre la voie à l'analyse des systèmes complexes, comme les entreprises, en mettant en avant le système global, les sous-systèmes, mais également les interactions qui s'opèrent.

Dans cette approche, comme toute entreprise, l'entreprise industrielle peut être vue comme un système à savoir selon (de Rosnay, 1975) « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisé en fonction d'un but* ». L'entreprise industrielle est alors définie comme un ensemble de sous-systèmes organisés en vue de produire des biens à livrer au client.

La **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** représente le système entreprise ainsi que les 5 principaux sous-systèmes et leurs principales interactions. Sont également représentées, les interactions entre le système entreprise et son environnement au sens large, les clients et les fournisseurs. Ces interactions peuvent être composées de flux physiques, de flux d'informations ou encore de flux financiers. Nous nous concentrerons, par la suite, sur le système de production qui fait l'objet de notre étude.

Chaque sous-système joue un rôle particulier que nous décrivons brièvement, car chaque sous-système fait l'objet de larges développements dans son champ disciplinaire. Il s'agit ici d'apporter un éclairage global permettant de cadrer notre objet d'étude :

- Système stratégique : grâce à l'analyse et au diagnostic de l'environnement ainsi que de l'entreprise elle-même, les dirigeants fixent les grandes orientations stratégiques c'est-à-dire à long terme (généralement au-delà de 2 ans). Il s'agit d'établir la vision de l'entreprise (ce qu'elle ambitionne de faire) et de décliner cette vision au travers de choix en termes de marchés, de type de produits, de financement, d'implantation et d'organisation générale. Ces choix stratégiques sont ensuite déclinés notamment en politique commerciale, de production et de distribution de façon à aligner les objectifs de chaque sous-système avec les objectifs stratégiques.
- Système commercial : il intervient en amont et en aval de la production. Dans une vision extrêmement simplifiée : il détermine l'offre de l'entreprise et évalue la demande client en amont, et met en place, en aval, les actions supports à la vente du produit (communication, suivi des commandes...).

- **Système de production** : son objectif est de réaliser la production en fonction de la demande transmise par le service commercial. Il est à l'origine des flux physiques internes de l'entreprise. Pour y parvenir, un ensemble de processus de décisions et d'actions sont nécessaires. Ils seront détaillés dans le paragraphe suivant, car ils sont **l'objet de notre étude**.
- Système de distribution : C'est le 2nd sous-système qui est centré sur les flux physiques. Il gère la livraison des produits en aval de l'entreprise soit directement vers les clients soit au travers du réseau. Depuis plusieurs années maintenant, le système peut gérer également les flux retours.
- Système administratif : il est constitué de l'ensemble des fonctions dites de soutien qui fournissent les ressources et informations nécessaires au fonctionnement des autres sous-systèmes. Il inclut notamment les services Recherche & Développement, comptable, financier, ressources humaines, Qualité Sécurité et Environnement (QSE), les achats généraux, la direction des systèmes d'information...

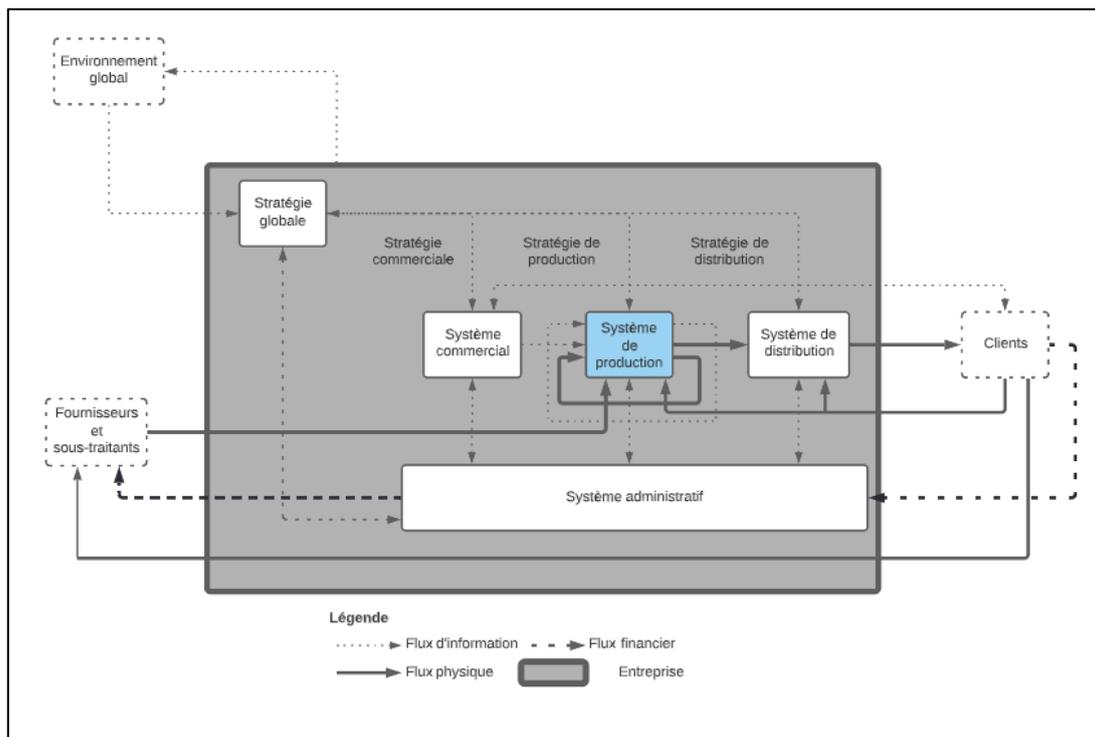


Figure I-1 Représentation systémique d'une entreprise industrielle adaptée de [Belmahdi \(1995\)](#)

Notre objectif n'est pas de décrire précisément l'ensemble des flux existants, mais d'en donner une vision globale pour l'entreprise industrielle. Les flux physiques sont limités aux systèmes de production et de distribution et les flux financiers aux échanges entre l'entreprise et ses clients et fournisseurs. Il n'y a pas de circulation financière stricto sensu entre les systèmes même s'il existe des systèmes de facturation interne dans certains groupes industriels. Quant aux flux d'informations, ils existent dans et entre tous les sous-systèmes, et entre le système et son environnement et sont souvent bidirectionnels. Cette réciprocité dans la transmission des informations est caractéristique de la vision systémique qui implique que les décisions ou actions d'un sous-système ont nécessairement un impact sur les autres sous-systèmes.

([Le Moigne, 2011](#)) considère que tout système se décompose lui-même en 3 sous-systèmes. Il propose le modèle O-I-D (Opération-Information-Décision) pour représenter cette décomposition.

I-2.2 Modèle OID et niveau de décision

Le système entreprise est composé de différents sous-systèmes (Administratif, de production, de distribution...) qui, d'après ([Le Moigne, 2011](#)), peuvent être eux-mêmes décomposés en 3 sous-systèmes : le système opérant, le système d'information et le système de décision.

Le système opérant est celui qui réalise les opérations ou processus du système considéré. Selon la norme ISO 9001, *un processus est un système d'activités qui utilise des ressources pour transformer les éléments d'entrée en éléments de sortie*. Ainsi chaque système de l'entreprise possède un système opérant qui réalise plusieurs processus. Ainsi le système commercial accomplit plusieurs processus tels que les processus de prospection, de commande ou encore de facturation.

Le système information acquiert et mémorise les informations qu'il transmet au système de décision. Ce dernier assure la coordination des actions de décisions que doit prendre le système à chaque instant ainsi que la conception de nouvelles solutions et leur finalisation. On utilise couramment aujourd'hui le terme de « système de pilotage » pour évoquer le système décisionnel de l'entreprise industrielle.

Toujours d'après (Le Moigne, 2011), le système de pilotage prend des décisions de 3 niveaux, Stratégique, Tactique et Opérationnel. Cette typologie a été schématisée par (Ansoff, 1968) qui en propose une vision pyramidale telle que présentée dans la Figure I-2.

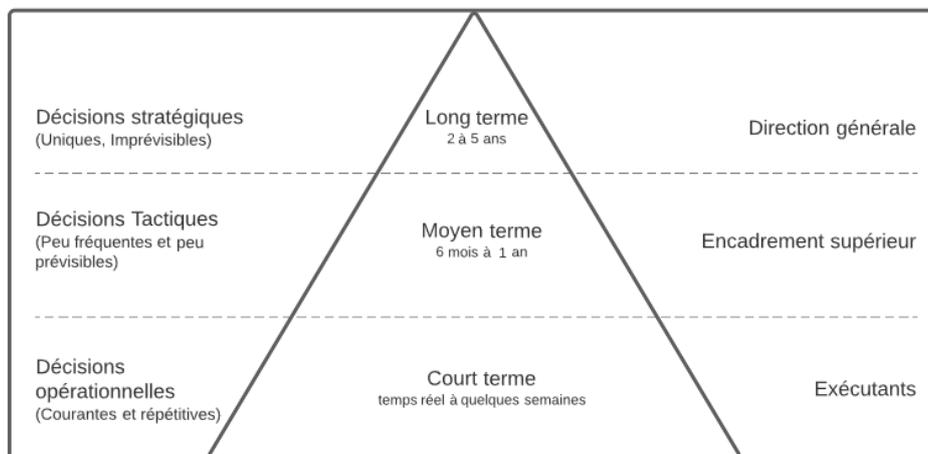


Figure I-2 Typologie des décisions d'après Ansoff (1968)

Les décisions stratégiques sont souvent vues comme des décisions de long terme (2 à 5 ans), prises par la direction générale. Elles concernent la finalité de l'entreprise, son développement et sa pérennité. Elles engagent fortement l'entreprise, car leurs conséquences sont irréversibles. Elles sont peu nombreuses, imprévisibles et par conséquent non programmables.

Les décisions opérationnelles sont celles prises à court terme (temps réel à maximum quelques semaines) par les exécutants (cadres ou opérationnels). Elles concernent le fonctionnement quotidien de l'entreprise et peuvent facilement être remises en cause. Elles sont nombreuses, programmables et répétitives.

Les décisions tactiques sont toutes celles qui ne sont ni stratégiques ni opérationnelles (Ansoff, 1968; Le Moigne, 2011). Elles sont prises sur le moyen terme par les directions fonctionnelles et concernent la mise en œuvre des ressources de l'entreprise dans le but d'atteindre les objectifs stratégiques.

Si l'on couple cette vision des décisions et le modèle O-I-D pour les sous-systèmes de l'entreprise, on peut en déduire que le système de pilotage de chacun de ces sous-systèmes prend des décisions opérationnelles et tactiques et participe aux décisions stratégiques sur les problématiques le concernant. C'est également le cas pour le système de production que nous allons détailler.

I-2.3 Focus sur le système de production

Le système de production est l'un des sous-système de l'entreprise industrielle qui se décompose lui-même en 3 types de systèmes d'après le modèle OID de (Le Moigne, 2011).

Modélisation O-I-D

Le système de production est le cœur de métier de l'entreprise industrielle. D'après le modèle OID, il pourrait être représenté sous forme pyramidale comme indiqué dans la [Figure I-3](#).

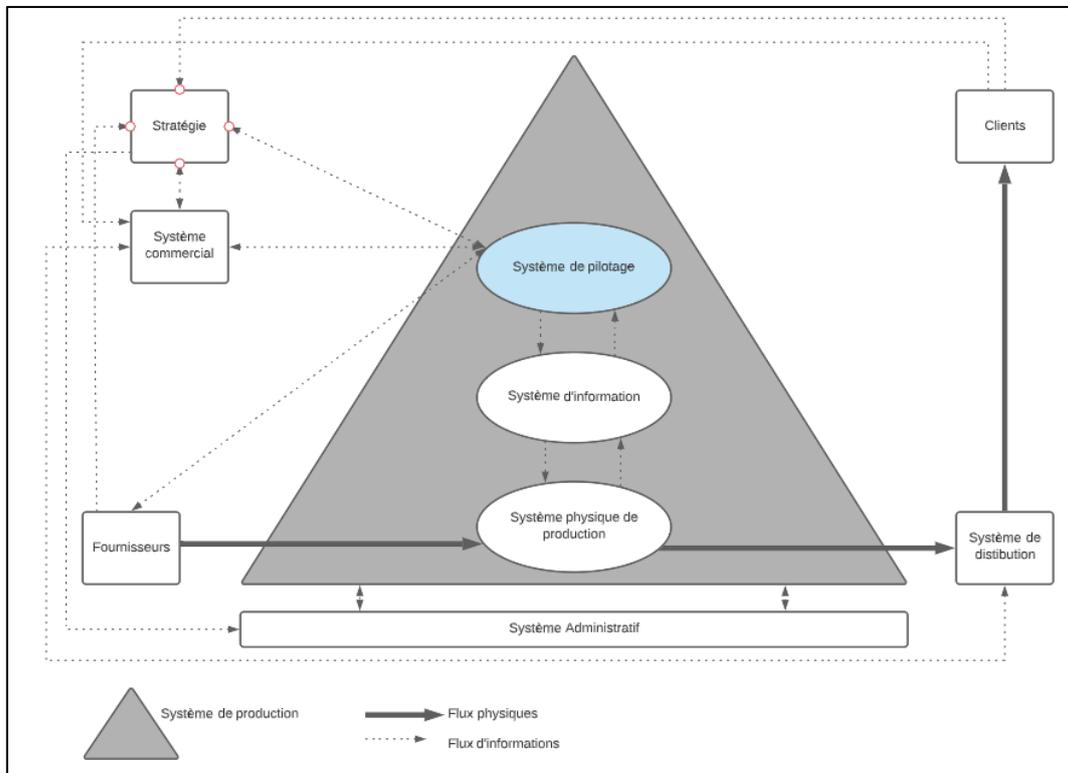


Figure I-3 Couplage vision systémique et OID du système de production et de son environnement

Le **système opérant, ou système physique de production**, réalise la fabrication des produits à partir :

- D'un programme de production: la liste des ordres de fabrication (OF) à réaliser sur un horizon temporel donné.
- De matières et composants livrés par les fournisseurs en fonction des demandes établies par l'entreprise sur la base du programme de production (ordre d'approvisionnement ou OA)
- De ressources productives qui se répartissent en 2 groupes : les ressources actives qui participent directement à la valeur ajoutée du produit et les ressources passives (matériel de manutention, de stockage). L'ensemble des ressources peut être divisé en ressources humaines et équipements.
- De gammes de fabrication : d'après le dictionnaire de l'APICS (American Production and Inventory Control Society), *les gammes sont les documents établis par le bureau des méthodes décrivant la méthode de fabrication d'un article donné. Elles incluent les opérations à réaliser, leur séquençement, les différentes cellules de productions impliquées et les standards de réglage et de fonctionnement. Elles incluent parfois le niveau de qualification des opérateurs, les contrôles qualité obligatoires, le matériel de contrôle à utiliser...*
- De nomenclatures (ou Bill Of Materials BOM) : toujours d'après l'APICS, *la BOM est la liste des sous-ensembles, des composants et des matières premières utilisés dans un article parent montrant les quantités requises pour chacun afin de réaliser le produit assemblé.*

Le **système d'information** qui assure la coordination entre les décisions et l'exécution des processus en centralisant et transmettant les informations et décisions entre le système opérant, ici le système physique de production, et son système de pilotage.

Enfin, **le système de pilotage** du système productif prend un ensemble de décisions en fonction des informations lui parvenant notamment des systèmes commercial et de distribution et de son système opérant pour répondre à la demande client dans le respect de la stratégie globale. Les 3 niveaux de décisions (Stratégique, Tactique et Opérationnel) s'appliquent au pilotage du système de production. On peut citer à titre d'exemple :

- Au niveau stratégique : délocalisation de la production, stratégie de réponse à la demande, recours à la sous-traitance, nouveaux investissements (machines ou infrastructures productives) ... Ces décisions bien que relevant du système de production, sont généralement prises en collaboration avec la direction générale car leur impact sur les autres sous-systèmes et sur la performance est important.
- Au niveau tactique : mode de déclenchement des ordres, recrutement, organisation du temps de travail, organisation physique de l'atelier, fixation des tailles de lots, politique de gestion de stocks, moyen de manutention ...
- Au niveau opérationnel : engagement des ressources (heures supplémentaires, équipes en plus ou en moins), ordres de réapprovisionnement, lancement de production ...

L'approche systémique que nous venons de décrire, nous donne une vision globale du système de production au sein de l'entreprise industrielle. Cette vision est ensuite détaillée grâce à l'approche O-I-D qui peut être approfondie avec l'approche par les processus qui détaille le contenu.

Approche par processus du système de production

La définition du terme processus par la norme ISO 9001 souligne la complémentarité des approches systémiques et par processus qui considère les processus comme des systèmes. Ainsi les processus peuvent être vus comme des sous-systèmes du système productif représentant les activités principales de ce dernier.

Pour parvenir à l'exécution du processus de fabrication, le système de production s'appuie sur un ensemble de processus internes dont certains seulement entrent dans le périmètre direct du système productif à savoir : fabriquer, planifier, gérer les stocks et contrôler.

- Le processus *Fabriquer* est au centre de cette vision. Elle regroupe au sens large l'ensemble des procédés de fabrication (ou process) et les activités périphériques comme la manutention ou la maintenance qui permettent de transformer les matières premières et composants en produits finis afin de répondre au besoin client.
- Le processus *Planifier* permet le **calcul des besoins en production et en approvisionnements**, la détermination des ressources nécessaires à la fabrication et le lancement effectif des ordres. Il est alimenté par le plan stratégique, la demande réelle et prévisionnelle, les données techniques (Gammes et nomenclature), le niveau de stocks internes et la planification des livraisons fournisseurs.
- Le processus **Gérer les stocks** établit la ou les **politiques de gestion de stocks** en fonction des besoins de la production et des objectifs de l'entreprise. Il permet le suivi et la mise à jour des informations de disponibilité ou de rupture. Ce processus intègre également **la gestion physique des stocks** avec la supervision des magasins et la manutention au sein de l'entreprise.
- Le processus *Contrôle* représente la **supervision de la production** dans l'atelier au sens respect du planning, des temps alloués et non à celui du contrôle qualité des produits. Il peut être considéré comme intégré au système d'information de production. Il remonte les informations en temps réel pour réaliser les **ajustements à court terme de la planification en cas de dérive**. Il remonte également des informations sur le fonctionnement du système physique de production pour des adaptations à moyen et long termes comme, par exemple, l'adaptation des process entraînant la modification des gammes.

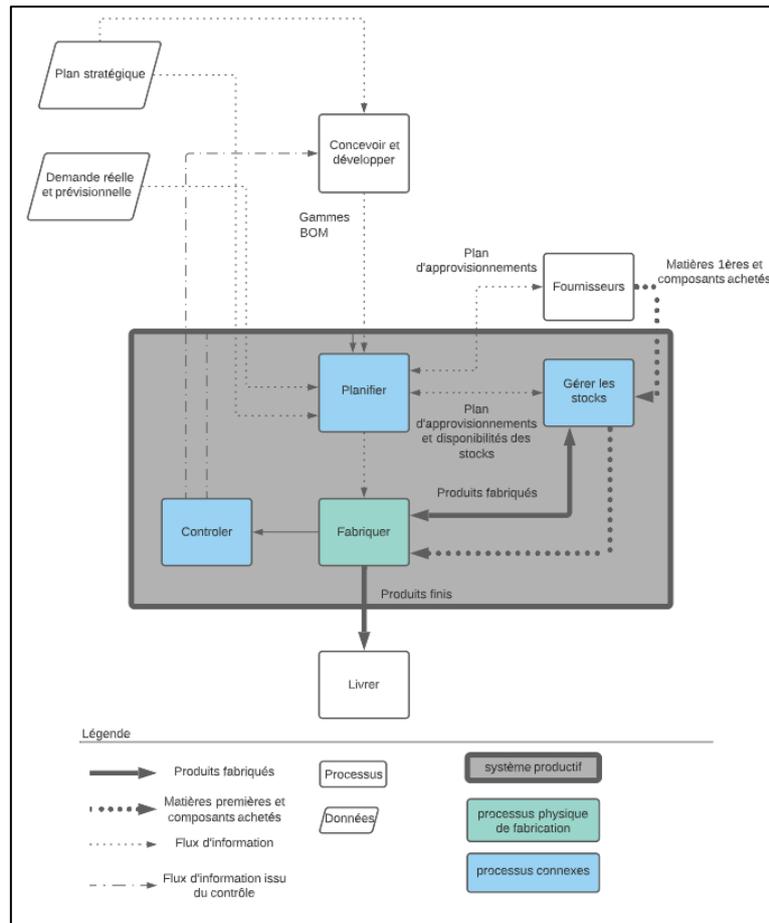


Figure I-4 Approche processus du système de production adaptée de Belmahdi (1995)

La Figure I-4 suivant représente le périmètre du système productif (en gris) et les processus principaux qui le composent (en couleur). Il démontre également les interactions existantes avec les systèmes ou données connexes.

Parmi les principaux processus connexes, on peut retenir la conception et le développement des Nomenclatures et des Gammes qui sont indispensables à la réalisation de la production mais qui dépendent respectivement du service R&D et du bureau des méthodes et non de la production. La livraison quant à elle dépend généralement du service logistique ou expéditions selon les entreprises, rarement de la production. Les organisations industrielles actuelles ont plus ou moins intégré ces processus connexes au sein de « directions industrielles » ou de « directions des opérations » afin de garantir la cohérence des décisions et de répondre au mieux au client.

La coordination de tous ces processus au sein du système productif est indispensable à la réalisation de l'objectif principal du système de production qui est de répondre au besoin client. **La performance du système de production peut donc être définie comme sa capacité à répondre au besoin client tant en termes quantitatifs que qualitatifs.** Cependant, cette vision purement orientée marché, est quelque peu restrictive, car le **système de production participe plus généralement à la performance de l'entreprise.**

Cette notion de performance de l'entreprise est largement discutée dans la littérature et ne se limite pas à la vision client. La définition préalable de la performance est essentielle dans le cadre de son évaluation car elle conditionne les résultats et leur interprétation. Nous en présentons donc une brève analyse.

I-2.4 Performance et entreprise industrielle

La notion de performance n'est pas propre aux entreprises industrielles mais afin de comprendre les enjeux particuliers nous commençons par définir la performance globale.

Performance globale

La notion de performance est polysémique et évolutive. Il ne s'agit pas pour nous d'en faire une analyse complète, car les débats sont ouverts dans bon nombre de champs disciplinaires, mais nous nous concentrerons sur le domaine de l'entreprise. S'il n'y existe pas de définition consensuelle, on peut cependant, d'un point de vue général, retenir de (Bourguignon, 2000) un certain nombre de caractéristiques relatives à la performance applicables au domaine de l'entreprise :

- La performance dépend d'un objectif (but) ;
- Elle est multidimensionnelle si les buts sont multiples ;
- Elle est l'effet, le résultat d'un ensemble d'actions
- Elle est subjective car l'objectif des actions est de rapprocher la réalité d'un souhait

D'après cette vision, la performance de l'entreprise est définie comme étant « *la réalisation des objectifs organisationnels, quelles que soit la nature et la variété de ces objectifs. Cette réalisation peut se comprendre au sens strict (résultats, aboutissement) ou au sens large du processus qui mène au résultat (action)...* ». Le concept sous-jacent est donc la fixation des objectifs stratégiques qui doit permettre d'orienter les décisions et actions de chaque sous-système. Ces objectifs doivent refléter la vision de l'entreprise, sa raison d'être.

Comme évoqué par (Berrah et al., 2000), longtemps la performance a été considérée comme seulement basée sur sa pérennité assurée par la maîtrise des coûts, mais cela est devenu insuffisant. Le concept de performance globale a émergé depuis plusieurs années pour mettre en avant la nécessité de considérer plusieurs axes au sein de la performance. La performance globale, d'après (Reynaud, 2003), comprend trois dimensions principales. La dimension économique, est la vision traditionnelle de la performance centrée sur le client et la capacité à dégager, pour les propriétaires, des bénéfices, en répondant à ses attentes. Viennent ensuite la performance sociale (égalité de traitement, conditions de travail et respect des droits de l'Homme) et la performance environnementale (diminution de la pollution, sécurité des produits et des installations, utilisations de ressources renouvelables).

Pour (Morin et al., 1994), la performance se décline selon 4 dimensions : (i) *la pérennité* (rentabilité financière, qualité des produits, compétitivités sectorielle et internationale), (ii) *l'efficacité économique ou la valeur ajoutée* (productivité, capacité à économiser les ressources) (iii) *la valeur des RH* (climat social, rendements, mobilisation et développement des salariés) (iv) *la légitimité auprès des groupes externes* (satisfaction des clients, des bailleurs de fonds, des régulateurs et de la communauté). Cette 2^{de} analyse place, elle aussi, la pérennité et l'efficacité au premier plan, mais elle inclut les groupes externes ce qui ajoute la dimension Sociétale de la performance. Dans cette approche, le client est vu comme un groupe externe à satisfaire, mais cette satisfaction du client est la raison d'être du système industriel et est donc souvent intégrée à la performance économique.

En s'appuyant sur ces 2 approches complémentaires, **nous pouvons convenir que la performance globale de l'entreprise comporte 4 dimensions : Economique, Sociale, Sociétale et Environnementale, chacune étant indispensable.**

Si l'ensemble des systèmes de l'entreprise industrielle participe à la performance globale, **le cœur de notre étude est le système productif qui entretient des liens avec les 4 dimensions de la performance.** La performance industrielle est souvent vue au travers du **triptyque qualité-coût-délai (QCD)**. Cette vision est très largement utilisée au sein des entreprises car elle représente les principales attentes que le système productif doit satisfaire pour assurer la réponse au client et permet leur traduction en objectifs internes. Si cette vision « traditionnelle » peut paraître simplificatrice étant donnés les enjeux du monde actuel, elle pourrait cependant intégrer une grande partie des objectifs sous-jacents de la performance globale telle que nous l'avons définie au travers des 4 dimensions. Par ailleurs, étant donnée sa large diffusion, elle offre un cadre approprié pour expliciter la contribution du système productif à la performance de l'entreprise.

Interaction des processus du système de production sur le triptyque qualité-coût-délai

Le système de production doit avant tout satisfaire les clients pour assurer la pérennité de l'entreprise. Comme évoqué précédemment, leurs attentes sont souvent présentées à travers le triptyque QCD qui se décline en objectifs internes pour l'entreprise. Il s'agit pour l'entreprise de produire à moindre coût pour vendre au meilleur prix en fonction d'un niveau de qualité et de délais attendu par ses clients.

L'axe qualité est la capacité à répondre à la demande client tant en termes quantitatif (livrer la quantité demandée) que **qualitatif** (avec le niveau de qualité attendu qui peut inclure des attentes plus vertueuses et responsables qu'un simple niveau de conformité matériel). Sur l'aspect quantitatif, le processus de planification et la gestion de stocks sont directement responsable de la réponse au client. Sur la partie qualitative, on peut considérer que les décisions prises pour assurer le niveau de qualité requis relève davantage des systèmes connexes (R&D, bureau des méthodes, maintenance ou service Qualité) que du système productif lui-même. Ce dernier est généralement garant de la bonne exécution des process de fabrication mais pas des choix amont ni des méthodes d'évaluation.

La dimension **coût** peut être vue sous **un angle strictement comptable** c'est-à-dire comme **la capacité à maîtriser l'ensemble des coûts du système de production permettant de maximiser le résultat** de l'entreprise et donc d'assurer sa pérennité voire son développement. La plupart des décisions prises dans le cadre des processus du système de production ont une influence sur le coût (temps d'ouverture, nombre de ressources...). La dimension Coût peut également être envisagée **sous un angle plus financier qui vise la préservation de la trésorerie** permettant à l'entreprise de faire face à ses dépenses à court terme. Cette vision est souvent moins valorisée mais elle est pourtant capitale car le manque de trésorerie est à la base de près d'un quart des défaillances d'entreprises (INSEE, 2015). Dans le cadre du système productif, **la gestion de stocks et la planification sont directement corrélées à la trésorerie disponible**. La 1^{ère} agit sur le montant des stocks en fonction de la politique choisie et la seconde peut faire varier la vitesse des flux et donc la valeur des en-cours notamment en fonction de la politique de lotissement. Dans la plupart des secteurs industriels, les stocks et les en-cours impactent négativement la trésorerie car ils impliquent leurs règlements avant le paiement client.

Enfin, **l'axe délai peut être défini comme la capacité à livrer le client à temps**, ni trop tôt ni trop tard. Si les livraisons en avance ne mettent pas en danger la production des clients, elles sont néanmoins parfois refusées pour des raisons d'encombrement et/ou des motifs financiers. Le système productif et le système de distribution sont les principaux garants de l'atteinte des objectifs même s'ils subissent les contraintes des autres systèmes (commercial notamment). Au sein du système productif, l'ensemble des processus est directement impliqué dans le respect des délais.

Les processus du système de production agissent sur les 3 axes de la performance industrielle au travers de différents leviers (décisions) stratégiques, tactiques et opérationnels. Le [Tableau I-1](#) ne se veut pas exhaustif, mais illustre l'impact de décisions de chaque processus du système de production sur les 3 axes de performance. Le processus de contrôle assure le réajustement en cas de dérive sur chaque axe de la performance.

Tableau I-1 Exemples d'interactions processus du système de production/triptyque QCD

		Processus du système de production			
Axes de performance	Niveaux de décision	Planifier	Gérer les stocks	Fabriquer	Contrôler
Qualité	Stratégique				Fréquence des contrôles Délais de réaction
	Tactique			Amélioration continue	
	Opérationnel	Lancement des ordres		Contrôle au poste	
Coût	Stratégique	Mode de réponse à la demande		Organisation physique de l'atelier	
	Tactique	Lotissement Mode de déclenchement des ordres	Politique de stock Taille de lots	Engagement des ressources Temps de setup	
	Opérationnel	Lissage de charge			
Délai	Stratégique			Flexibilité des moyens	
	Tactique	Délai de sécurité Équilibrage de lignes	Placement des stocks Dimensionnement des stocks de sécurité		
	Opérationnel	Lissage de charge		Lot de transfert	

Comme nous venons de le décrire, l'ensemble des processus du système de production impacte la performance industrielle vue au travers du triptyque Qualité-Coût-Délai. L'environnement VUCA faisant peser des contraintes importantes sur les processus du système de production, il a nécessairement un impact sur la performance. Nous décrivons tout d'abord les liens entre l'environnement VUCA et le système industriel avant de présenter les impacts potentiels sur la performance.

I-3 Système de production et VUCA

Si d'un point de vue interne l'entreprise industrielle peut orienter ses choix concernant les processus de production pour améliorer la performance Qualité-Coût-Délai, elle n'en a pas pour autant la maîtrise. En effet d'un point de vue externe, les 3 axes sont influencés par des conditions de l'environnement qui peuvent dégrader la performance.

De ce fait, le pilotage de la production a toujours intégré ces contraintes et a évolué au fil du temps pour s'adapter aux conditions. Néanmoins, le contexte VUCA exacerbe cette influence au niveau des 3 axes de la performance conduisant à l'émergence de nouveaux enjeux et la recherche de nouvelles solutions notamment du point de vue du pilotage de la production. Nous présentons d'abord les évolutions historiques avant de nous concentrer sur les impacts actuels du contexte VUCA sur la performance.

I-3.1 Évolution de la gestion de production face à l'environnement

Depuis les débuts de l'ère industrielle, la nature et le volume de la demande ont fortement évolué ce qui a conduit les entreprises à s'adapter et à faire évoluer leurs méthodes de gestion de production. Cette mutation a été mise en évidence par (Koren 2010) qui la résume dans le schéma suivant.

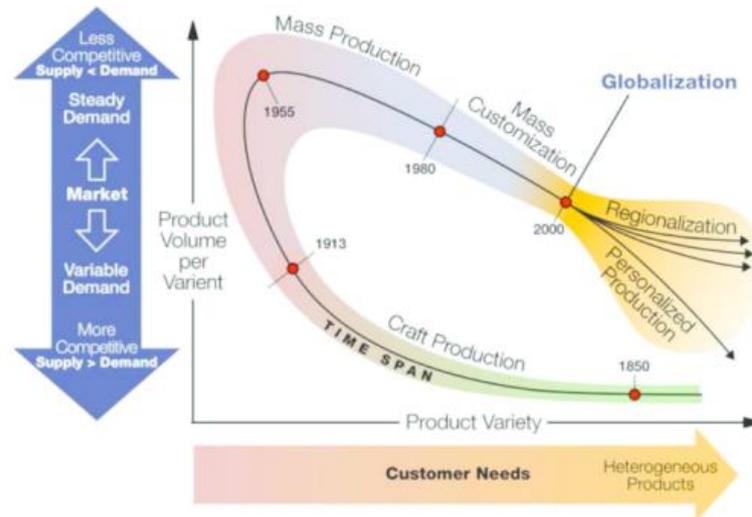


Figure I-5 Évolution des systèmes de production d'après Koren 2010

L'augmentation de la demande **au début du 20^{ème} siècle** a justifié la mise en place de systèmes de production permettant de gérer la **volumétrie**. Les idées de Taylor puis de Ford reposant notamment sur la standardisation ont permis le développement industriel, la production et la consommation de masse. Le prix des produits diminue, les rendant accessibles au plus grand nombre. Dans un contexte de demande peu variée et supérieure à l'offre, le pilotage de la production ne représente pas un enjeu industriel, **l'essentiel est d'assurer la disponibilité des matières et des ressources**.

La fin des 30 Glorieuses a laissé place une **inversion de la tendance de marché** avec une contraction de la demande. Cette dernière est liée à la baisse du pouvoir d'achat combinée à une multiplication des produits proposés. Les consommateurs ont davantage de choix et arbitrent donc leurs achats. Les industriels doivent **gérer la diversification de la production**. Il s'agit des challenges liés aux **changements de séries, de la planification de production et de la gestion des approvisionnements**. Les méthodes Material Requirement Planning (MRP) développées dans les années 70 par (Orliky, 1975) puis Manufacturing Resources Planning (MRP2) prennent alors tout leur sens : calculer les besoins et caler la production en fonction de la demande réelle et prévisionnelle. Dans les années 80 et 90, cette méthode est considérée comme la base indispensable pour la gestion de production.

Dès le milieu des années 80, les industriels occidentaux les plus avancés dans le domaine de la production se tournent vers les idées issues du **Toyota Production System (TPS)** développé au Japon entre la fin des années 40 et 70 par Taichi Ohno (Ohno, 1989). Le contexte économique japonais d'après-guerre, avec un marché étroit et des problèmes de pénurie de matières notamment, ne permettait pas de bénéficier des effets d'échelle à la base du Fordisme. L'objectif chez Toyota étant de **produire de petites séries de façon industrielle avec des coûts réduits**, Ohno développe une nouvelle méthode de gestion de production le Toyota Production System (TPS). **La production à la demande, la qualité totale et la flexibilité en sont des piliers**. Les résultats comparatifs d'une usine américaine de production automobile de masse et d'une usine japonaise Toyota présentés par Womack, Jones et Roos dans leur livre de 1992 (Womack et al., 1990), font état d'écarts de performance considérables : 50% d'heures en moins, et un taux de défauts presque 3 fois inférieur, le stock est également considérablement réduit, 2 semaines de stock moyen de pièces contre 2 heures chez Toyota. De plus, l'étude montre que les usines américaines utilisant le TPS deviennent alors aussi performantes que leurs concurrentes japonaises.

Forts de ce constat, dès les années 90, des industriels occidentaux se sont penchés sur les idées du TPS pour répondre à leurs nouveaux impératifs (séries plus petites et maintien de la rentabilité). Cette nouvelle approche a permis le développement de la customisation de masse. Du point de vue de la gestion de production, la planification se complexifie et les entreprises ont de plus en plus recours à des systèmes

informatisés pour les aider dans leur gestion. La prévision de la demande est également un enjeu majeur et les ajustements de planning sont fréquents.

Depuis les années 2000, le développement des technologies de l'information de la communication, l'émergence de nouvelles techniques de production et la globalisation des économies bousculent les marchés. On passe de la customisation de masse à une personnalisation et une régionalisation de la production avec un quasi-retour à l'individualisation des produits. La boucle du schéma de Koren se referme pouvant évoquer un retour en arrière. Or il n'en est rien. Il s'agit pour les industriels de fabriquer les produits, parfois uniques, de manière industrielle et donc d'en maîtriser les coûts et les délais. Les enjeux sont les mêmes que dans les années 90, mais sont accentués. En ce qui concerne la gestion de production, les années 2000 à 2010 ont signé l'avènement des méthodes japonaises et leur occidentalisation au travers du Lean Manufacturing et de l'excellence opérationnelle.

Aujourd'hui, la multiplication des contraintes de l'environnement économique caractérisée par l'acronyme VUCA (Volatilité, Incertitude, Complexité et Ambiguïté) et le nouveau visage de la demande rendent l'exercice de pilotage de la production de plus en plus complexe. Les modèles de pilotage de production existants ne sont pas toujours pertinents et sont parfois inefficaces dans ce nouveau contexte. Ils freinent également l'émergence de nouveaux modèles car les critères à considérer sont multiples. Les conséquences sur les 3 axes de la performance du système productif sont potentiellement importantes. Nous les développons dans le paragraphe suivant.

I-3.2 QCD et VUCA

Le contexte VUCA combine une accentuation des contraintes existantes et l'apparition de nouveaux phénomènes. Il impacte fortement les 3 axes de la performance industrielle. L'existence d'impacts et leur ampleur dépend nécessairement du secteur industriel concerné et du profil de l'entreprise. Par conséquent, les exemples donnés ci-dessous illustrent le propos mais ne s'appliquent pas tous de la même façon à l'ensemble des secteurs industriels et des entreprises.

Le [Tableau I-2](#) représente les impacts potentiels du contexte VUCA sur la performance industrielle.

Tableau I-2 Exemples d'impacts de l'environnement VUCA sur le tryptique QCD

	V Volatilité	U Incertitude	C Complexité	A Ambiguïté
Qualité		Standards attendus évoluant rapidement (ex intégration de nouvelles technologies)	Nombre de critères souhaités par le client	Critères parfois contradictoires (haut niveau de qualité faible coût)
Coût	Modifications de la demande existante	Incertitude de la demande prévisionnelle	Produits quasi individuels (réduction des effets d'échelle)	
Délai	Modifications de la demande existante	Incertitude de la demande prévisionnelle	Exigence de plus en plus élevée sur la tenue des délais	

La conséquence de ces impacts est la difficulté à maintenir un niveau satisfaisant de performance sur ces 3 axes.

Du point de vue de la **Qualité**, les enjeux majeurs résident dans la complexification et l'évolution incessante de l'offre rendue nécessaire par les nouvelles demandes clients (Incertitude). La standardisation et la durée de vie des produits permettaient une stabilisation des critères de qualité et donc leur maîtrise par les entreprises. **La vitesse des changements tant marketing que technologiques et la complexification de l'offre réduisent drastiquement les délais de développement et les processus de validation. Les problèmes de qualité sur les nouveaux produits sont un vrai challenge pour les entreprises.** À titre d'illustration, on peut évoquer les rappels de véhicules neufs qui sont effectués par les constructeurs automobiles de toutes nationalités. Même Toyota, souvent cité à titre d'exemple de la maîtrise de la qualité, a dû rappeler en 2020 plus de 5 millions de véhicules pour un problème de pompe à carburant. Samsung dans sa course à la technologie contre Apple a rencontré des difficultés avec son modèle Galaxy Note. Plusieurs appareils ont pris feu, ce qui a entaché

l'image de la marque. Ce phénomène témoigne de la difficulté à renouveler les produits rapidement pour répondre à la demande client en assurant le niveau de qualité des nouveaux produits.

Les coûts sont principalement pénalisés par la volatilité, l'incertitude et la complexité. La volatilité de la demande conduit à une difficulté à planifier correctement la production et les approvisionnements. Pour un certain nombre de secteurs industriels, les fluctuations de la demande conduisent à des **modifications fréquentes de planning qui sont coûteuses** en changement de série et qui ne permettent pas toujours de respecter les quantités économiques de fabrication. Par ailleurs, la volatilité concerne également les **coûts d'approvisionnements**. Si certains secteurs sont plus particulièrement concernés par la variabilité des coûts d'approvisionnement, les tensions sont ressenties par une grande majorité des secteurs industriels et **l'ampleur des variations atteint des niveaux inédits depuis les années 70**, notamment en ce qui concerne le coût de l'énergie. Ces variations résultent de la spéculation au niveau mondial sur certaines matières, du contexte géopolitique, des accidents climatiques mais également des conséquences de la crise COVID. Elles sont donc induites par l'incertitude des phénomènes qui pèsent sur les marchés au niveau mondial. Elles conduisent les industriels à **utiliser des stratégies de protection notamment via des achats spéculatifs** qui contribuent eux-mêmes à l'amplification de la volatilité. **Elles remettent parfois en cause les politiques de gestion de stock** qui visaient leur minimisation, et ont un impact sur l'organisation industrielle. La complexification de l'offre mais également des supply chains mondiales peut également contribuer à l'augmentation des coûts. Il est en effet de plus en plus difficile d'avoir une vision d'ensemble permettant une optimisation globale.

Enfin concernant les **Délais**, les phénomènes qui conduisent à leur dérive sont les mêmes que pour les Coûts (variabilité de la demande, incertitude des approvisionnements, complexification de l'offre). La conséquence principale, pour beaucoup de secteurs industriels, est **la difficulté à réaliser et tenir un planning de production fiable**. Les changements sont fréquents ce qui conduit à des difficultés organisationnelles qui rendent les délais de plus en plus difficiles à tenir et l'exercice de planification encore plus difficile.

Face aux multiples sources d'incertitudes de l'environnement VUCA, certains responsables sont tentés de faire évoluer les modèles existants ou de les remplacer par des solutions alternatives afin de préserver la performance du système productif.

I-3.3 Des solutions à court terme parfois contre productives

Pour faire face aux variations, certains responsables de la planification adoptent des **comportements de protection** qui sont parfois contreproductifs (**stocks de sécurité, des délais** supplémentaires ou encore des **tailles de lot** visant à diminuer le coût unitaire). Si ces mesures sont entendables, elles **aggravent les conséquences de l'environnement VUCA** en éloignant les entreprises de la demande réelle. Elles démultiplient l'effet coup de fouet, dit « Effet Bullwhip » (Forrester, 1961), c'est-à-dire l'amplification de la distorsion du signal de la demande en amont de la supply chain.

Le phénomène peut être schématisé comme dans l'exemple donné par la [Figure I-6](#). Il est constaté tant au sein de chaque entreprise que tout au long de la Supply Chain et peut être amplifié par les comportements individualistes des maillons. Plus la position dans la chaîne est éloignée de la demande finale, plus la distorsion et les difficultés de pilotage de production sont importantes. Les comportements de protection utilisés par les responsables de la planification aggravent la situation et rendent la prise de décision difficile à tous les niveaux de la supply chain.

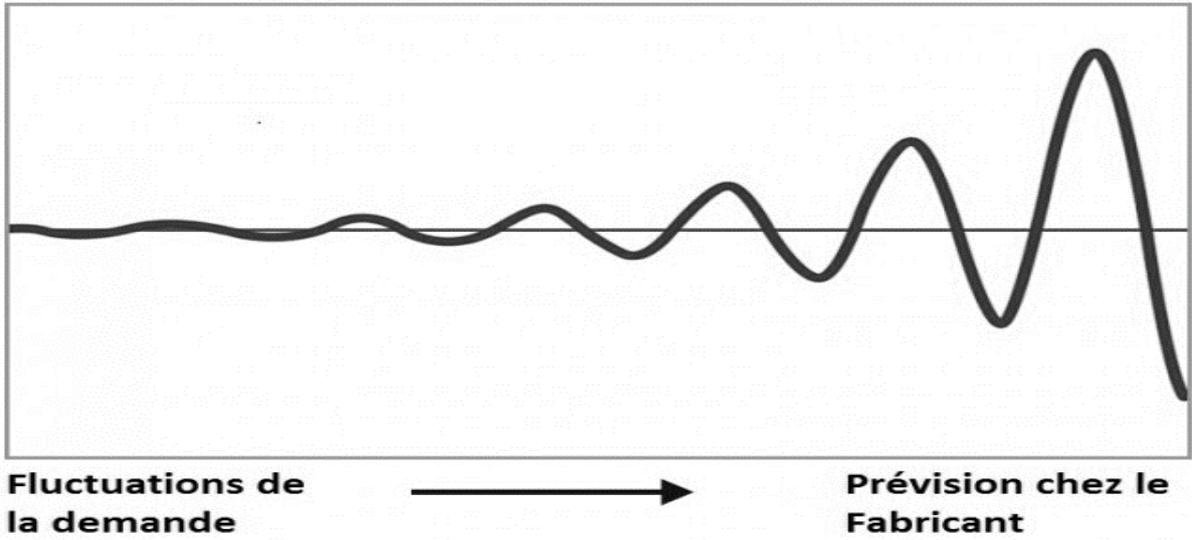


Figure I-6 : La propagation de l'effet coup de fouet au sein de la supply chain

Face aux inconvénients de ces solutions pragmatiques, de nouvelles approches sont développées. Elles jouent sur les différents niveaux du système de production pour permettre de faire face à l'incertitude de l'environnement.

Conclusion

L'entreprise industrielle peut être considérée sous l'angle systémique, c'est-à-dire qu'elle est un système constitué de plusieurs sous-systèmes (commercial, de production, de distribution, administratif). Le système productif est au cœur de l'entreprise industrielle. Les décisions qui sont prises relèvent de 3 niveaux en fonction de la nature des décisions et de l'horizon temporel concerné (Stratégique, Tactique ou Opérationnel). Cette vision systémique peut être couplée à l'approche processus qui détaille système de production en 4 processus principaux : la fabrication, la planification, la gestion de stock et le contrôle.

Dans la vision systémique, la performance globale de l'entreprise industrielle, qui intègre 4 dimensions : Économique, Sociale, Sociétale et Environnementale, résulte de l'ensemble des sous-systèmes et de leur capacité à prendre en compte l'environnement à travers la stratégie globale. Ces objectifs de performance sont ensuite répercutés sur l'organisation du système productif.

La prise en compte de l'environnement par le système de production a toujours existé car c'est une condition indispensable pour la performance industrielle. Aujourd'hui, l'environnement des entreprises industrielles est devenu particulièrement instable. Il se caractérise par l'acronyme VUCA (Volatilité, Incertitude, Complexité et Ambiguïté) qui définit un ensemble de contraintes pesant sur le système productif. **Nous considérons que l'ensemble de ces contraintes constitue au sens large l'incertitude** qui caractérise le contexte VUCA. Elle impacte les 3 axes de la performance poussant les entreprises industrielles à chercher de nouvelles solutions au sein du système productif pour faire face à l'incertitude de tous ordres. Cependant les solutions sont parfois contreproductives et les décideurs sont en demande d'approches permettant de faire face à l'incertitude en préservant la performance. **Dès lors, quelles sont les solutions potentielles pour faire face à l'incertitude du contexte et comment aider les décideurs dans le choix d'une solution adaptée permettant de préserver la performance du système industrielle ?**

Le chapitre 2 nous permettra de recenser les solutions existantes pour faire face à l'incertitude dans les entreprises industrielles. Nous étudierons dans un 1^{er} temps les modèles d'évaluation de la performance d'abord de façon générale puis centrée sur la performance industrielle. Nous évoquerons ensuite les différentes solutions existantes pour les entreprises industrielles pour faire face à la variabilité en fonction du niveau de décision sur lesquelles elles jouent. Nous terminerons par une focalisation sur le système de pilotage de la production qui constitue l'une des approches possibles pour faire face à la variabilité.

Chapitre II

État de l'art

<u>II-1</u>	<u>ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE</u>	22
II-1.1	Historique	22
II-1.2	Définition des systèmes d'évaluation de la performance	22
II-1.3	PMS et entreprise industrielle	24
<u>II-2</u>	<u>GESTION DE L'INCERTITUDE DANS LE SYSTÈME DE PRODUCTION</u>	26
II-2.1	Les approches stratégiques : adapter le système physique de production	26
II-2.2	Les approches tactiques : Intégrer l'incertitude	27
II-2.3	Les approches opérationnelles : la gestion de la variabilité	33
<u>II-3</u>	<u>LE SYSTÈME DE PILOTAGE DE PRODUCTION : PRODUCTION PLANNING AND CONTROL SYSTEMS (PPC)</u>	35
II-3.1	Définitions et périmètre	36
II-3.2	Principaux PPC	38
II-3.3	Adapter le PPC au contexte	46
<u>CONCLUSION</u>		52

RÉSUMÉ

Les conséquences majeures de l'environnement actuel conduisent les entreprises à la recherche de solutions pour gérer l'incertitude au niveau de leur système productif. Le [Chapitre I](#) a permis de démontrer les liens entre performance globale et performance industrielle via l'approche Qualité-Coût-Délai. L'objectif est clairement de maintenir voire dans certains cas d'améliorer le niveau de la performance. **Quelles sont les solutions potentielles pour faire face à l'incertitude du contexte et comment aider les décideurs dans le choix d'une solution adaptée permettant de préserver la performance du système industriel?**

Nous présenterons ici les principales approches de mesure de la performance existantes afin d'identifier les principaux indicateurs clés de performance utilisés pour évaluer la performance industrielle.

Nous aborderons ensuite différents types d'approches mobilisables dans le cadre du système productif pour faire face à ce nouvel environnement VUCA et à l'incertitude qui en découle. Elles seront présentées en fonction du niveau décisionnel impacté (Stratégique, Tactique ou Opérationnel).

Enfin, nous détaillerons les principaux système Production Planning and Control (PPC) ainsi que les critères de choix qui permettent de choisir un PPC adapté en fonction du contexte industriel. Nous terminerons par une grille de synthèse permettant de positionner les PPC en fonction des caractéristiques du contexte industriel.

II-1 Évaluation de la performance

Comme évoqué au [Chapitre I](#), la définition de la performance n'est pas consensuelle néanmoins la plupart des auteurs s'accordent sur la nécessité de mesurer la performance pour être capable de mettre en œuvre la stratégie de l'entreprise et de mener des actions d'amélioration continue. ([Bititci et al., 1997](#)).

II-1.1 Historique

La mesure de la performance industrielle a émergé avec la production de masse au début du 20^{ème} siècle et les approches se sont multipliées jusqu'à aujourd'hui ([Berrah et al., 2004](#); [Ravelomanantsoa et al., 2019](#)). Les évolutions sont essentiellement dues au changement de paradigme de la demande.

Jusque dans les années 50, la mesure de la performance est centrée sur la **productivité et la profitabilité** i.e. la capacité de l'entreprise à dégager des bénéfices. Pendant la période des 30 glorieuses, c'est **la croissance du profit** qui est au centre des préoccupations industrielles. La performance est alors essentiellement financière et tournée vers la maîtrise des coûts, le système comptable joue un rôle majeur.

À la fin des années 70 ou début des années 80 selon les secteurs, avec l'inversion du rapport offre-demande, les exigences des clients sont beaucoup plus importantes, la performance devient progressivement multicritères et les systèmes purement comptables ne sont plus adaptés ([Bititci et al., 1997](#); [Neely et al., 1995](#)). La performance intègre de **nouvelles dimensions comme le délai ou la flexibilité** du système productif. Cependant la performance globale est souvent la somme de performances locales des différents services de l'entreprise.

Dès les années 90, l'utilisation de **systèmes intégrés de mesure de la performance** (Performance Measurement Systems ou PMS) devient essentielle pour les entreprises ([Bititci, 1994](#)). Cependant, pour ([Berrah et al., 2004](#)), la plupart des PMS existants comportent deux inconvénients : la décomposition de l'objectif global en objectifs élémentaires à tous les niveaux organisationnels (stratégiques, tactiques et opérationnels) et, l'agrégation des mesures élémentaires pour déterminer la valeur de la performance globale.

Plus récemment, l'intégration au sein des PMS des problématiques liées à la **responsabilité sociétale** des entreprises est devenue également un enjeu majeur ([Dohou and Berland, 2010](#)).

II-1.2 Définition des systèmes d'évaluation de la performance

L'évaluation de la performance constitue un axe de recherche pour plusieurs communautés scientifiques (gestion, management, génie industriel notamment), et il est donc difficile de répertorier et d'identifier les principales approches existantes. L'objectif de notre travail n'est pas de réaliser un nouveau classement mais de montrer la complexité de l'évaluation de la performance et d'identifier les approches pertinentes dans le domaine du système productif des entreprises industrielles.

Pour ([Franco-Santos et al., 2007](#)), si la nécessité des systèmes de management de la performance (PMS ou Performance Management Systems) est largement partagée, leur définition n'est pas clairement établie. Ils identifient 17 définitions différentes qu'ils caractérisent en fonction de 3 dimensions : 8 fonctions-clés, 17 rôles potentiels et 13 processus principaux. Aucune de ces définitions ne recouvrent les mêmes éléments mais la majorité inclut la mesure de la performance et reconnaît la dimension stratégique des PMS.

Pour ([Berrah et al., 2004](#)), il s'agit d'un « *ensemble de mesures de la performance utilisé pour prendre des décisions de contrôle* ». Cette définition est basée sur une vision « Closed Loop » dans laquelle le contrôle est vu comme le processus permettant de réguler les actions en cas de dérives par rapport aux objectifs fixés à tous les niveaux de décisions stratégiques, tactiques et opérationnels. Par ailleurs, les auteurs distinguent deux types de performance : les mesures physiques, qui sont un simple constat, et l'évaluation de la performance qui est définie comme « *la comparaison objective entre les mesures et les objectifs* ».

([Bititci et al., 1997](#)) distinguent le PMS, qu'ils voient comme un système d'information, et le management de la performance qui s'appuie sur lui pour prendre des décisions permettant d'atteindre les objectifs. ([Neely et al., 1995](#)) étudient de façon approfondie l'évaluation de la performance et différencient les mesures individuelles, les PMS et leur méthode de construction (design). Pour les auteurs, le PMS est « *un*

ensemble de mesures utilisé pour quantifier l'efficacité et l'efficacité des actions ». Pour (Ravelomanantsoa et al., 2019), l'efficacité est l'adéquation des résultats avec les objectifs et l'efficacité celle entre les moyens utilisés et les résultats obtenus. Si plusieurs PMS sont identifiés comme des références telles que le Balanced Scorecard (Norton et Kaplan 1992) ou le modèle SCOR (Supply Chain Operations Reference model) du Supply Chain Council (2000, 2008), les différences de définition retenues par les auteurs expliquent en partie que différents travaux sur cette thématique n'identifient pas le même nombre de PMS.

Ainsi, Ravelomanantsoa et al., (2019) mènent une étude extensive qui inclut la partie design des PMS. Ils répertorient 60 approches et les classent en fonction de 6 caractéristiques principales : (1) celles qui comprennent des recommandations génériques sur les PMS, (2) celles qui proposent une architecture structurelle ou (3) l'architecture procédurale de PMS, (4) celles qui proposent une liste d'indicateurs génériques i.e. applicables à l'ensemble des entreprises, (5) celles qui fournissent des outils et un support méthodologique et enfin (6) les modèles de référence. Chaque approche étudiée peut combiner plusieurs caractéristiques. D'après les auteurs, les plus complètes sont les modèles de référence qui « *contiennent des descriptions standard des processus d'entreprise, un réseau de dépendances entre les processus standard, des indicateurs standard, une représentation standard des caractéristiques et des fonctionnalités des logiciels* ». C'est la vision la plus restrictive des PMS et les auteurs en identifient seulement 6 : Malcolm Baldrige Nationality Quality Award, European Foundation for Quality Management, Polish Quality Award, Supply Chain Opérations Reference, Kanji's Business Excellence Model et Reference Model for PMM Framework and Measures.

(Berrah et al., 2004) quant à eux recensent 17 PMS et les classent en fonction du périmètre concerné (entreprise complète ou système de production) et précisent la nature de la décomposition des différents éléments du PMS, le type de mesure (physique ou évaluation de la performance) et l'existence d'un outil d'agrégation de la performance. (Folan and Browne, 2005) répertorient également 17 PMS mais seulement 4 sont communs avec l'étude de (Berrah et al., 2004). (Neely et al., 1995)  voquent une dizaine de PMS mais évoquent également des modèles plus restrictifs basés sur l'un des 4 aspects de la performance qu'ils identifient à savoir le c t, la qualité, le délai et la flexibilité.

Les années 80 et 90 conduisent à l'émergence de nombreux PMS. Mais sur les 15 dernières années, (Ravelomanantsoa et al., 2019) répertorient seulement 7 nouveaux PMS. Il s'agit davantage d'améliorer les modèles existants en prenant en compte de nouvelles dimensions (RSE notamment) ou en apportant des précisions.   titre d'exemple, le modèle SCOR intègre désormais une dimension supplémentaire Enable qui englobe les activités associées à la gestion de la Supply Chain (i.e. : gestion des règles commerciales, des performances, des données, des ressources, des installations, de la gestion des contrats...)

L'une des thématiques récentes est celle des PMS pour les petites et moyennes entreprises. En effet, parmi les 7 PMS récents, 4 s'adressent spécifiquement à cette catégorie d'entreprises.

Devant la richesse des approches, il paraît opportun de limiter notre approche à une vision restrictive des PMS c'est-à-dire aux modèles structurés faisant état de dimensions de la performance concernées et/ou des indicateurs retenus pour évaluer la performance. Ainsi, nous n'incluons pas les approches centrées sur le design et l'audit des PMS. L'objectif de l'analyse des PMS est d'identifier les indicateurs utilisés pour la mesure de la performance du système de production.

II-1.3 PMS et entreprise industrielle

Nous ne détaillerons pas les différents PMS, l'objectif étant d'en extraire les informations concernant la performance industrielle. Le **Tableau II-1** recense les principaux PMS et décrit quelques caractéristiques principales.

Tableau II-1 Principaux PMS et caractéristiques

PMS	Auteurs	Périmètre	Dimensions de la performance	Indicateur du système productif	Remarques	Critiques
Dupont Model	Dupont 1900	Entreprise	Retour sur Investissement (ROI)	<ul style="list-style-type: none"> Coût de production Stocks Créances clients 	Établit un lien direct entre les performance de production et la rentabilité	Vision à court terme
Performance Criteria system	(Globerson, 1985)	Production	À choisir par l'entreprise	<ul style="list-style-type: none"> Coût Productivité et efficacité pourcentage de défaut 	Système avec pondération	
Results and determinants framework	(Fitzgerald, 1988)	Entreprise	6 dimensions (compétitivité, performance financière, qualité, Flexibilité, utilisation des ressources, innovation)	<ul style="list-style-type: none"> Productivité, efficacité, flexibilité des volumes, du délai de livraison et des spécifications 	Certains indicateurs reflètent la performance réelle tandis que d'autres la déterminent. Les indicateurs industriels sont des déterminants	
SMART ou Performance Pyramid	(Cross and Lynch, 1988)	Entreprise	3 niveaux de mesures : opérationnel, Entreprise Groupe	<ul style="list-style-type: none"> Qualité, Coût, Délai de livraison, Temps de process, Productivité, Flexibilité 	Mise en évidence du lien entre niveau opérationnel et la stratégie	
Performance measurement matrix PMM	(Keegan, D. P. et al., 1989)	Entreprise	4 dimensions Coût/hors coûts Interne/externe	<ul style="list-style-type: none"> OTD Temps de cycle 		Lien difficile à percevoir entre les indicateurs et la performance globale
Measures for Time-based Competition	(Azzone et al., 1991)	R&D, opérations et Marketing	3 axes et 2 dimensions (interne et externe)	<ul style="list-style-type: none"> Adhérence aux dates Distance parcourue Pourcentage de valeur ajoutée sur temps total Respect du planning 		
Balanced score Card	(Kaplan and Norton, 1992)	Entreprise	4 dimensions Finance, client, process internes, innovation et apprentissage	Des exemples dans le texte d'origine mais pas de standard	Centré sur la stratégie et la croissance	Pas d'indicateur précis, très voire trop financier, pas de prise en compte des autres parties prenantes (salariés, fournisseurs)
Performance Prism	(Neely et al., 2002)	Entreprise	Satisfaction des parties prenantes grâce aux processus, à la stratégie et aux « capacités » de l'entreprise	<ul style="list-style-type: none"> Quality (consistency, reliability, conformance, durability, accuracy, dependability). Quantity (volume, throughput, completeness). Time (speed, delivery, availability, promptness, timeliness, schedule). Ease of use (flexibility, convenience, accessibility, clarity, support). 	Importance de l'alignement des objectifs Donne des thématiques à aborder dans le cadre de la performance industrielle mais pas des indicateurs	

				• Money (cost, price, value).		
IPMS (integrated performance measurement system)	(Bititci et al., 1997)	Entreprise	4 niveaux Prises en compte de l'externe		Relation entre les indicateurs	
Supply Chain Operation Reference	Supply Chain Council (1996) Version 12 ASCM (2017)	Supply Chain	6 process (Source, plan, make deliver, return and enable) 5 axes de performance Reliability, Responsiveness, Agility, Cost, Asset Management Efficiency	Ex : On-time, the right quantity, the right quality. cycle-time metrics,	Système hiérarchique avec proposition d'indicateurs pour chaque axe	
EFQM	EFQM 1998-2000-2019	Entreprise	Centré sur la qualité et sur une vision de long terme	À définir par chaque entreprise	Propose une approche mais pas les indicateurs	

La plupart des PMS ont logiquement une approche étendue à l'ensemble de l'entreprise mais les dimensions de la performance varient. Concernant la performance du système productif, elle est toujours intégrée dans les PMS mais les indicateurs utilisés varient. Certains PMS ne suggèrent pas directement d'indicateurs mais fournissent des recommandations aux entreprises utilisatrices afin qu'elles déterminent par elles-mêmes les indicateurs pertinents compte tenu de leur situation (SCOR, EFQM par exemple).

Le choix des indicateurs relève donc de la stratégie de l'entreprise qui opte soit pour un PMS soit pour la construction d'un système d'indicateurs ad hoc reflétant sa vision de la performance. Quels que soient les indicateurs industriels choisis, ils **sont influencés par les décisions prises par le système de pilotage du système productif**. Le [Tableau II-2](#) est un exemple montrant les liens entre les indicateurs, la performance et l'influence des décisions relevant du système de production. Il est donné à titre d'exemple mais ne se veut pas exhaustif ni sur les indicateurs utilisés ni sur les décisions relevant du système de production. Ce tableau montre, cependant, que l'approche QCD choisie permet de retranscrire la contribution de la performance industrielle à la performance de l'entreprise.

Tableau II-2 Exemple de lien décision du système productif, KPI industriels et performance globale

Dimension	Exemple d'indicateurs	calcul	Lien avec la performance de l'entreprise	Décisions du système de production influençant l'indicateur		
				Stratégiques	Tactiques	Opérationnelles
Coût	Coût unitaire	Coût de production total/nombre unités produites	Résultat	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation de production • Choix du process • Investissement • Standardisation produits 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille de lot • Engagement des ressources • Recours à la sous-traitance 	Heures supplémentaires
	Productivité globale	Nb unités produites/nb heures utilisées	Résultat		<ul style="list-style-type: none"> • Création de lots de transfert • Amélioration des processus 	Réunion d'équipe
	Montant des stocks	Montant des stocks/Chiffre d'affaires	Liquidités	<ul style="list-style-type: none"> • Mode de réponse à la demande 	<ul style="list-style-type: none"> • Taille de lot • Lot de transfert • Politique de gestion de stock 	
	Montant du WIP	Montant des stocks/Chiffre d'affaires	Liquidités		<ul style="list-style-type: none"> • Mode de déclenchement des ordres • Taille de lot • Lot de transfert 	ordonnancement

Dimension	Exemple d'indicateurs	calcul	Lien avec la performance de l'entreprise	Décisions du système de production influençant l'indicateur		
				Stratégiques	Tactiques	Opérationnelles
Qualité	Taux de rebut interne	Nb de rebuts/nb total de pièces	Coûts		<ul style="list-style-type: none"> • Fréquence des contrôles • Délais de réaction • Amélioration continue • Autonomie des ouvriers 	Type de contrôle (par prélèvement, ou systématique)
	Taux de retour clients		Coûts Image de l'entreprise			
Délais	Temps de traversée des OF	Écart entre la date de lancement et la date de mise à disposition	Stock WIP OTD		Mode de déclenchement des ordres Taille de lot Lot de transfert Ordonnancement Stock et délai de sécurité	Ordonnancement
	Écart de temps	Écart entre temps prévus et temps réels	Stock WIP OTD			
	On Time Delivery	Nb de commandes à l'heure/nb de commandes total	Image de l'entreprise Résultat	Mode de réponse à la demande		

Le [Chapitre I](#) a démontré l'impact de l'environnement VUCA sur la performance du système de production. La 1^{ère} partie de ce Chapitre 2 consacrée à l'étude de la littérature dédiée à l'évaluation de la performance met en évidence le lien entre la performance industrielle et la performance de l'entreprise. En effet la quasi-totalité des PMS prennent en compte la performance du système productif même si les dimensions considérées ne sont pas toujours les mêmes. La difficulté réside à la fois dans le choix des dimensions mais également dans le choix des indicateurs représentatifs. Elle permet cependant de valider l'intérêt de l'approche QCD qui permet d'intégrer les indicateurs de performance industrielle à la performance de l'entreprise.

La définition de la mesure de la performance a été réalisée et le lien entre performance du système productif et performance de l'entreprise établi. Il s'agit désormais de recenser les approches mobilisables dans l'optique de gérer l'incertitude dans les systèmes de production.

II-2 Gestion de l'incertitude dans le système de production

Pour gérer le nouveau contexte VUCA et limiter l'impact négatif sur la performance, des approches différentes peuvent être mobilisées dans le cadre du système de production. Elles se distinguent par le niveau décisionnel auquel elles s'appliquent : Stratégique, Tactique ou Opérationnel.

II-2.1 Les approches stratégiques : adapter le système physique de production

Comme évoqué précédemment, les décisions stratégiques sont celles qui engagent l'entreprise sur le long terme (2 à 5 ans) et dont les conséquences sont difficilement réversibles. En matière de gestion de la variabilité, au niveau stratégique, les industriels peuvent opter pour un système de production flexible (Flexible Manufacturing System FMS) ou reconfigurable (Reconfigurable Manufacturing System). Ce type de décisions qui touche directement le système physique de production relève effectivement de la stratégie de par le volume et la nature des investissements consentis.

Flexible Manufacturing System

La recherche de flexibilité du système de production pour répondre à des variations de demande n'est pas nouvelle ([Buzacott, 1982](#); [Slack, 1987](#); [Gerwin, 1993](#)). Cependant plusieurs solutions existent parmi lesquelles le systèmes de production, flexibles (FMS) ([Wiendahl et al., 2007](#)). Les FMS sont définis par ([Koren and Moriwaki, 1999](#)) comme des « *systèmes capables de produire divers produits en quantité variable. Ils*

s'appuient sur des machines à commandes numériques dédiées et un ensemble de robots de transport pilotés via un système centralisé ». Ils sont une alternative aux lignes dédiées qui prévalaient jusque dans les années 80 (Wiendahl et al., 2007).

(Browne et al., 1984) proposent une classification des FMS intégrant plusieurs critères. O'Grady and Menon (1986) établissent une revue de littérature et mettent en perspective les systèmes de planification et de contrôle liés aux FMS. Gupta and Goyal (1989) proposent une analyse des types de flexibilité, une classification de la performance des FMS et intègrent notamment la dimension qualitative. (Manu et al., 2018) identifient la liste des problématiques actuelles liées aux FMS.

Selon (Koren and Moriwaki, 1999), les FMS sont une avancée comparativement aux lignes dédiées pour la prise en compte de la variabilité du volume et du mix produits. Mais ils citent une étude de Usloy et Heytler, de 1998, concluant d'une part que les FMS n'ont pas été largement adoptés et d'autre part que les utilisateurs en étaient globalement peu satisfaits, notamment en raison de leur coût. En effet, pour pouvoir répondre à toutes sortes de demandes, les machines à commandes numériques sont suréquipées et surdimensionnées, ce qui entraîne un gaspillage de ressources.

Reconfigurable Manufacturing Systems

Selon (Koren and Moriwaki, 1999), les RMS sont une alternative aux FMS pour répondre à la variabilité de la demande. Leur définition est la suivante « un système de fabrication reconfigurable (RMS) est conçu dès le départ pour une évolution rapide de sa structure, ainsi que des composants matériels et logiciels, afin d'adapter rapidement la capacité de production et la fonctionnalité d'une famille de pièces en réponse à des changements soudains du marché ou des exigences réglementaires ».

Koren et al. (2018) le définissent à travers plusieurs caractéristiques : *i Scalabilité* : le système adapte la capacité de production aux évolutions de la demande en maintenant la productivité, *ii Customisation* : le système physique ainsi que le système de contrôle sont personnalisés au sein d'une famille de produits, *iii Convertibilité* : une évolution rapide du système est possible en cas de changement de produit *iv Modularité* : les différentes composantes sont modulables (architecture, machines, logiciels, etc), *v Intégrabilité* : capacité à intégrer de nouveaux modules rapidement et précisément grâce à l'interface entre les machines et les logiciels, *vi Diagnosticabilité* : monitoring du système en temps réel permettant une analyse rapide des « causes racine ».

Les RMS offrent une voie intéressante pour répondre à la variabilité de la demande. Mais comme évoqué par (Bortolini et al., 2018) un certain nombre de challenges subsiste dans leur mise en œuvre comme la configuration des systèmes physique et global, le système de transport, la formation des familles de produits, le planning et l'ordonnancement.

Les approches stratégiques sont celles qui permettent d'adapter le système physique de production à la variabilité de la demande. De par leur nature, ces solutions sont les plus coûteuses et les plus risquées pour les entreprises. D'autres approches sont mobilisables aux niveaux tactique et opérationnel.

II-2.2 Les approches tactiques : Intégrer l'incertitude

Les approches tactiques sont celles qui agissent sur le moyen terme (6 mois à 1 ans). Plusieurs types de méthodes sont mobilisables. Toutes reposent sur la modélisation, i.e. la construction d'un modèle, qui est une représentation simplifiée d'un système (Maria, 1997) ou d'un processus (Carson, 2005) dont l'objectif est de prédire les effets de changements sur le système ou processus ou sur sa performance. Les systèmes ou processus modélisés peuvent être existants ou bien nouveaux.

Dans le cadre des systèmes de production, il s'agit d'intégrer l'incertitude dans le modèle afin de comprendre son influence et de faire des choix permettant de limiter son impact sur la performance industrielle ou bien de vérifier que le système de production est dimensionné pour faire face à l'incertitude. Chacune de ces approches nécessite une phase de modélisation. La modélisation est le processus qui conduit à la réalisation d'un modèle représentant une version simplifiée du système.

Modélisation

Les modèles peuvent être classés selon plusieurs logiques que nous présentons dans la suite de cette section.

Typologie des modèles

D'après (Law, 2013), les modèles peuvent être classés selon plusieurs dimensions

- **Physique - logique** : Un modèle physique est une réplique du système dont l'échelle de représentation peut être réduite (ex : maquette du système solaire, banc d'essai). Le modèle logique décrit le comportement du système grâce aux langages logico-mathématiques i.e. symboles et/équations. La représentation des systèmes de production dépend des objectifs recherchés. L'un des exemples les plus connus de modélisation physique dans le domaine des systèmes logistiques et de production est le Beer Game qui illustre l'effet coup de fouet proposée par Forrester dans les années 60 et développé et popularisé par Sterman (Sterman, 1989). Dans le domaine de la recherche, la représentation du système de production est davantage réalisée grâce à des modèles logiques pouvant être résolus de différentes façons en fonction de leur nature et de leur complexité.
- **Déterministe-stochastique** : Les modèles déterministes sont basés sur une loi connue ou hypothétique de sorte que des valeurs d'entrée données produisent toujours le même résultat (ex : des loi physiques) (Banks et al., 2014). Inversement Lorsque les variables sont soumises à une variabilité ou lorsque le système est soumis à des aléas, le modèle est dit stochastique : les mêmes valeurs d'entrée peuvent produire différents résultats. Les systèmes de production sont, par nature stochastiques, car soumis à l'incertitude qu'elle soit liée à l'environnement (demande des clients, aléas transport...) ou interne au système (pannes, absentéisme).
- **Statique-dynamique** : Un modèle statique est un modèle sur lequel le temps n'a aucune influence (Kelton et al., 2015). Le modèle dynamique évolue en fonction du temps. Par nature les systèmes de production sont influencés par le temps à tous les niveaux : la demande, la production elle-même. Cependant des modèles statiques peuvent-être utilisés pour résoudre des problèmes « simples ».
- **Temps discret-continu** : Cette distinction ne s'applique qu'aux systèmes dynamiques puisqu'il s'agit de déterminer comment la notion temporelle est intégrée dans le modèle. Dans le modèle discret le système évolue par sauts successifs dans le temps en fonction de la survenue d'événements (arrivée d'une commande ou d'un client, panne d'une machine, changement d'état d'une ressource ...) (Kelton et al., 2015). Chaque changement d'état donne lieu à un nouvel état du système qui donne lieu à la mesure des variables. Dans un système continu, c'est le défilement continu du temps qui fait évoluer le système, les variables sont mesurées en permanence. Les systèmes de production peuvent relever des deux types : les industries de process (chimie, verrerie par exemple) peuvent être considérées comme des systèmes continus tandis que la majeure partie des autres industries relève des systèmes discrets.

En synthèse, il apparaît que l'étude des systèmes de production dans leur globalité relève souvent de modèles logiques, stochastiques et dynamiques. Le temps peut être discret ou continu en fonction des processus de production, cependant, des processus continus peuvent être évalués par des modèles discrets.

À cette 1^{ère} typologie, s'ajoute celle établie par (Mula et al., 2006), qui classe les modèles pour la production en fonction de la prise en compte de l'incertitude. Ils distinguent les modèles conceptuels, analytiques, de simulation et ceux basés sur l'intelligence artificielle. Leur approche est davantage basée sur les modèles de résolution que sur la modélisation du système de production lui-même. Ils attribuent cependant chacun de ces modèles d'incertitude à l'un des 7 niveaux de planification de la production qu'ils identifient. D'après eux, les modèles analytiques sont présents à tous les niveaux depuis la gestion de stock jusqu'au planning de la supply chain tandis que les modèles conceptuels sont dédiés au calcul des besoins. Les modèles de simulation sont quant à eux utilisés dans le cadre de l'intégration de la variabilité au niveau du plan global de production, du calcul des besoins, de la planification de la capacité et des ressources.

Dans le cadre de l'étude des systèmes de production, il est possible de représenter soit le système de production dans sa globalité soit seulement un processus en particulier.

Processus de modélisation

Le processus conduisant à la réalisation d'un modèle comprend plus ou moins d'étapes selon les auteurs. D'après (Sargent, 2010), deux visions s'opposent : celle de la simplicité et celle de la complexité. Il opte pour l'approche simple parce qu'elle facilite le processus de vérification et de validation.

L'approche de (Sargent, 2010) décrite par la Figure II-1 comporte donc seulement 3 étapes principales (définition du problème, création d'un modèle conceptuel et celle d'un modèle informatique). Pour (Banks et al., 2014), offrent une vision hiérarchique comprenant une partie modélisation avec 7 étapes précédant la partie simulation. (Balci, 2012), propose une approche basée que le cycle de vie des modèles et intègre les opérations de vérification et de validation à chacune des 10 étapes.

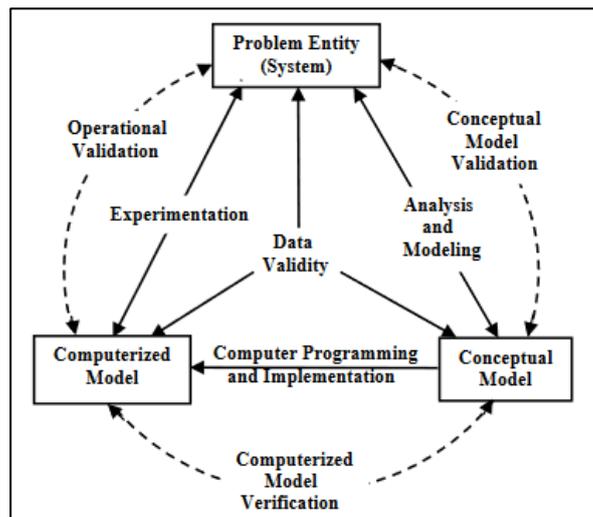


Figure II-1 Version simplifié du processus de modélisation d'après (Sargent, 2010)

Quelle que soit la description du processus retenue, la modélisation intègre ces étapes de vérification et de validation du modèle afin de s'assurer de son exactitude et donc de la validité des résultats qui en résultent. D'après (Sargent, 2010), la vérification consiste à s'assurer que le modèle est correctement réalisé i.e. que le programme et son implémentation sont corrects. La validation consiste à fournir « *la preuve qu'un modèle informatisé, dans son domaine d'application, possède une plage de précision satisfaisante, compatible avec l'application prévue du modèle* ». Pour (Balci, 2012), plus simplement, la vérification consiste à répondre à la question « est ce qu'on crée le modèle correctement ? » ; la validation répond à la question : « est-ce qu'on crée le bon modèle ? ». (Sargent, 2010) propose un certain nombre d'approches permettant la vérification et la validation à tous les niveaux du modèle.

Modèles conceptuels

La réalisation d'un modèle passe par plus ou moins de formalisme. Il existe un certain nombre de langages et de méthodes de modélisation. Il ne s'agit pas de faire un inventaire exhaustif de toutes les approches mais d'identifier celles qui sont les plus courantes dans le domaine de la modélisation des systèmes de production.

Les premiers sont des langages informatiques ou graphiques qui permettent de décrire le système, les entités qui les composent ainsi que les relations qui existent entre elles. Il existe un nombre important de langages applicables à différents champs d'application. Parmi ceux utilisés pour modéliser les systèmes de production, on distingue :

- **Value Stream Mapping** : méthode graphique dont l'objectif est de diagnostiquer le flux de création de la valeur dans l'entreprise. Étant donné son objectif, cette approche est populaire auprès des

entreprises mais un peu moins utilisée dans le domaine de la recherche. Si elle est souvent évaluée en tant qu'outil Lean Manufacturing, (Lian and Van Landeghem, 2007), proposent la VSM comme base pour une simulation.

- **Business Process Model Notation (BPMN)** : langage graphique simple permettant de modéliser les processus au sein des entreprises. Il est développé par OMG (Object Management Group) depuis 2007 et sa dernière version remonte à 2011 (OMG, 2011)
- **Unified Modeling Language (UML)** : d'après (Vernadat, 2020), il s'agit plutôt d'un « ensemble de notations de modélisation réalisé à la fin de années 90 pour unifier plusieurs méthodes de modélisation orientées objet (OMT, Boovh, OOSE...) ». S'il est initialement dédié à la modélisation et aux développements des logiciels, il est couramment utilisé dans la modélisation des processus d'entreprise.
- **Réseau de Petri** : c'est une approche graphique et mathématique issue des travaux de (Petri, 1962) qui permet notamment de modéliser les systèmes de production en mobilisant les variables discrètes. Il permet une large utilisation notamment dans le domaine des entreprises afin de modéliser les systèmes de production et les supply chains.

Les second sont les cadres de modélisation qui s'appuient généralement sur un langage particulier et qui définissent précisément les différents composants et la méthode de construction. Parmi ceux applicables aux systèmes de production, on peut citer :

- **IDEF (Integrated DEfinition)** : qui a été développée par Ross (Ross, 1985, 1977) dans les années 70 pour l'armée de l'air américaine sous le nom de ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing). Cette méthode permet la modélisation des systèmes complexes en les traduisant sous forme graphique. Elle comprend 16 sous-méthodes chacune ayant son propre périmètre. Les IDEF 0 à 3 sont particulièrement adaptés aux entreprises et aux systèmes de production. IDEF0 (ou SADT *Structured Analysis and Design Technique*) est dédiée à la modélisation des activités, IDEF1 à celle des informations, IDEF1x aux structures de données, IDEF2 aux modèles de simulation, IDEF3 à la description des processus.
- **CIMOSA** (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture). Ce cadre, créé en 1992, dans le cadre d'un consortium européen, vise, d'après l'association CIMOSA, à « élaborer une architecture de système ouverte pour CIM et de définir un ensemble de concepts et de règles pour faciliter la construction de futurs systèmes CIM ». Il était initialement spécifique aux entreprises industrielles et distingue les éléments relevant du contexte général de ceux relevant de l'organisation en particulier. L'extension de ce cadre a donné lieu à la création de la norme ISO 19439 : 2006 « cadre de modélisation d'entreprise ».
- **MERISE** (*Méthode d'Étude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprises*) : l'objectif de ce cadre est de concevoir un système d'information comprenant un ensemble de sous-modèles. L'une des originalités est de séparer le modèle conceptuel de données (MCD) du modèle de traitement (MCT) ce qui permet de prolonger le système d'information car le changement dans l'organisation des données qui est potentiellement fréquent ne nécessite pas le remaniement des traitements.
- **GRAI** (Graphs with Results and Actions Inter-related) : ce cadre a été développé par les travaux de thèse de (Doumeingts, 1984) qui propose une base théorique pour modéliser l'entreprise afin de la modifier. L'approche est composée d'un modèle de référence, d'un formalisme (représentations graphiques des concepts) et d'une approche structurée (réalisation de l'implantation). Elle distingue le système existant du système cible et les niveaux réalisationnel et conceptuel (modèle conceptuel de l'existant et du système cible). Le cadre a ensuite été élargi avec le cadre GIM, initialement GRAI-IDEF0-MERISE (Roboam et al., 1989) puis GRAI Integrated Methodology, qui adopte une vision centrée sur l'utilisateur dans le développement du nouveau système industriel.

Nous avons présenté les principaux modèles conceptuels à travers les langages et les cadres méthodologiques. Des compléments peuvent être trouvés dans les travaux (Aguilar-Savén, 2004) qui comparent les approches de modélisation et la revue de littérature de (Vernadat, 2020) qui établit l'historique

de la modélisation en entreprise, et fait le point sur les derniers développements concernant ce champ disciplinaire.

D'après (Sargent, 2010), une fois le modèle conceptuel établi, le processus de modélisation conduit à la réalisation d'un modèle informatique permettant son implémentation. **Chaque type de modèle informatique correspond à une approche tactique** pouvant être mobilisée dans le cadre de l'intégration de l'incertitude au niveau tactique du système de pilotage de la production. Nous identifions 4 approches principales.

Simulation

Selon (Kelton et al., 2015), « la simulation est une ensemble de méthodes et d'applications permettant de reproduire le comportement de systèmes réels » ce qui permet de les étudier certaines sans les perturber. Pour (Shannon, 1998), la simulation est « *le processus de conception d'un modèle d'un système réel et de réalisation d'expériences avec ce modèle dans le but de comprendre le comportement du système et/ou d'évaluer diverses stratégies pour le fonctionnement du système* ». Pour eux, les objectifs sont donc de comprendre et d'évaluer différents types de systèmes ou configurations en fonction de différents paramètres.

Pour (Jeon and Kim, 2016) la simulation est particulièrement bien adaptée aux problématiques des « *systèmes de production et des supply chain qui sont trop complexes et dynamiques pour être compris et analysés avec des outils mono-dimension comme les tableurs ou les diagrammes de flux* ». **Pour les entreprises, la simulation notamment permet de concevoir, optimiser et valider leurs systèmes de production. Elles peuvent ainsi tester les effets de la variabilité sur leurs systèmes actuels ou bien concevoir de nouvelles organisations permettant d'y répondre.**

Les techniques de simulation peut-être de différentes selon la nature du déclencheur du changement d'état du système :

- **Discrète** : un échancier à base d'évènement ou de temps fait évoluer l'état du système par sauts successifs. D'après (Jeon and Kim, 2016), dans le cadre des systèmes de production, la simulation à évènements discrets est utilisée pour les problématiques de gestion de stocks, de planification de la production, d'ordonnancement, d'optimisation de la distribution et du transport.
- **Continue** : Pour la simulation continue, c'est l'avance du temps qui modifie l'état du système (e.g. un objet qui se déplace, des cuves qui se remplissent...). Généralement les équations différentielles sont utilisées pour faire évoluer l'état du système. Pour (Jeon and Kim, 2016), la dynamique des systèmes est utilisée pour la modélisation des processus stratégiques du système de production comme les politiques de gestion de stock et les politiques de contrôle de production, l'étude de l'effet coup de fouet ...
- **À base d'agents** : ce sont les échanges entre agents qui déclenchent l'évolution du système. D'après les auteurs, la simulation à base d'agents est utilisée pour les problématiques de planification et l'allocation des ressources, l'étude de la production en réseau

(Mula et al., 2006) étudient les différents modèles pour la planification de la production sous incertitude. La simulation est utilisable dans 4 des 7 thématiques recherche de ce domaine : Plan global de production, planification des besoins, des capacités et planning des ressources. (Nam and Logendran, 1992) évoquent eux aussi la possibilité de recourir à la simulation dans le cadre de l'étude du plan global de production. Cependant, la revue de littérature de (Cheraghalikhani et al., 2019), démontre que la simulation est finalement assez peu utilisée dans le cadre de l'étude du plan global de production. En ce qui concerne les autres thématiques, (Mula et al., 2006) n'identifient pas dans leurs travaux de simulation concernant spécifiquement la gestion de stocks. Cela qui est contradictoire avec les remarques de (Jeon and Kim, 2016).

Simulation-optimisation

D'après (Carson and Maria, 1997), la simulation-optimisation est le processus qui conduit à trouver les meilleures valeurs de variables d'entrée parmi toutes possibilités sans explicitement évaluer chacune d'entre elles. Pour eux la simulation fournit des sorties qui servent à l'optimisation. Cependant, pour (Ladier et al., 2014), il existerait en réalité 4 types d'utilisation conjointe entre simulation et optimisation:

- **Optimisation au sein d'un modèle de simulation** : La décision optimale de sous-problèmes est obtenue à l'intérieur du modèle de simulation.
- **Le modèle de simulation fournit des données au modèle d'optimisation** : Les modèles de simulation génèrent des données qui sont ensuite utilisées dans un modèle d'optimisation.
- **Simulation dans un modèle d'optimisation** : la simulation peut être utilisée pour évaluer la fonction objectif associée à une solution obtenue à partir d'un modèle d'optimisation.
- **La simulation évalue les solutions d'optimisation dans différentes conditions** : suite à une optimisation la simulation permet de vérifier les résultats obtenus pour différentes hypothèses.

D'après (Fu et al., 2005), l'augmentation de la puissance de calcul et de mémoire a permis d'ouvrir de nouvelles possibilités pour l'optimisation-simulation. Ils évoquent notamment l'intérêt de la combinaison de ces approches. Du point de vue des systèmes de production, ils avancent un intérêt dans les cas d'implantation d'atelier, dans le choix de la meilleure politique de stock en fonction du coût, dans l'allocation des ressources de production, dans le choix des options d'ordonnancement. Les choix des méthodologies utilisées sont également discutés.

Le couplage simulation-optimisation permet la prise en compte de la dimension stochastique dans les divers problèmes évoqués et présentent donc un intérêt incontestable dans les méthodes permettant aux entreprises de faire face à l'environnement VUCA. Cependant, comme pour toute simulation, la simulation reste une méthode coûteuse et soumise à de nombreuses contraintes dans le contexte des entreprises (Banks et al., 2014; Kelton et al., 2015). S'ajoutent de surcroît des challenges liés aux méthodes d'optimisation.

Optimisation stochastique

L'optimisation stochastique est une approche qui intègre la variabilité dans le modèle et cherche à trouver la meilleure solution en moyenne. Les variables du modèle et les lois probabilistes qui les caractérisent sont connues (Yanikoğlu et al., 2019).

De nombreuses applications sont réalisées dans le domaine des systèmes de production. L'ouvrage de (Shapiro et al., 2009) donnent de nombreux exemples comme la planification et la gestion de stocks.

Cependant (Kouvelis and Yu, 1997) signalent que cette approche souffre d'un certain nombre de limitations. Tout d'abord elle nécessite l'assignation de probabilités aux différentes variables ce qui est un exercice difficile notamment à cause de l'interdépendance des facteurs. Par ailleurs, quelques facteurs induisent une forte corrélation avec les lois de distribution associées. Ils citent l'exemple des temps opératoires qui ont nécessairement une corrélation avec les lois choisies pour déterminer les pannes. Ce type d'approche donne des résultats moyens qui ne sont pas représentatifs pour des processus ayant un nombre d'occurrences limité. L'utilisation d'un taux de service permet d'évaluer la performance mais ne garantit pas les résultats en cas de réalisation des pires scénarii.

Optimisation robuste

D'après (Yanikoğlu et al., 2019), l'optimisation robuste consiste à trouver des solutions qui sont immunisées contre toutes les perturbations des données dans un ensemble dit d'incertitude. Pour (Kouvelis and Yu, 1997), cette approche peut également permettre de minimiser les regrets liés à la réalisation du pire scénario.

L'optimisation robuste est populaire parce qu'elle a un large éventail d'applications dans la pratique. D'après (Ben-Tal et al., 2009), plusieurs hypothèses sous-tendent l'environnement de décision dans lequel elle s'applique :

- Les décisions doivent être prises avant que les données réelles ne soient connues.
- Le décideur est pleinement responsable des conséquences des décisions qu'il prend seulement si les données réelles sont incluses dans l'ensemble d'incertitudes prédéfinies.
- Les contraintes du problème sont fortes, le décideur ne peut pas tolérer des violations de contraintes quand les données font partie de l'ensemble d'incertitudes prédéfinies.

Dans le domaine des systèmes productifs les applications sont nombreuses. D'après (Yanikoğlu et al., 2019) cette approche a été utilisée pour résoudre des problèmes de planification d'ordres, de process, d'ordonnement.

Les approches tactiques présentent un intérêt certain pour la prise en compte de l'incertitude dans les systèmes productifs cependant toutes nécessitent construction d'un modèle robuste, la possession de données fiables et parfois de lois de probabilités qu'il faut établir. Par ailleurs, leur accessibilité n'est pas assurée car elles nécessitent des compétences scientifiques importantes que toutes les entreprises industrielles ne possèdent pas toujours. La plupart des approches opérationnelles qui traitent la variabilité sur le terrain ne souffrent pas de ce problème et sont assez largement utilisées. Nous présentons 3 approches.

II-2.3 Les approches opérationnelles : la gestion de la variabilité

Il s'agit d'agir sur le système opérant du système productif et d'agir à court terme voire en temps réel. Trois types d'approches sont mobilisables pour faire face à la variabilité.

Élimination de la variabilité (lean)

Le lean production ou lean manufacturing est souvent perçu comme une émanation du Toyota Production System. Le terme même de Lean Manufacturing a été popularisé par (Womack et al., 1990) qui rendent compte des résultats obtenus par l'industrie nipponne et étudient les fondements de la production au plus juste i.e. le « lean production ». Cette philosophie de production, dont les prémices remontent à la fin des années 40, est basée sur la production en fonction de la demande. Pour (Womack et al., 1990) c'est « *un processus dynamique de changements guidés par un ensemble de principes systématiques et de meilleures pratiques visant l'amélioration continue. Le lean manufacturing combine le meilleur de la production de masse et de l'artisanat* ».

Cette définition initiale du Lean Manufacturing ne fait pas toujours consensus. Selon (Bhamu and Singh Sangwan, 2014), on répertorie 33 définitions. Pour eux, la définition a évolué au fil du temps démontrant une évolution du concept et également un manque de consensus sur le périmètre considéré. La définition du dictionnaire de l'APICS met en avant la recherche de minimisation de l'utilisation de ressources, la recherche et l'élimination des non-valeurs ajoutées mais aussi la flexibilité induite par cette philosophie permettant de répondre à la variété de la demande. On peut ajouter la notion d'amélioration continue clairement énoncée par nombre d'auteurs.

L'objectif n'est pas ici d'établir une définition précise du lean Manufacturing mais de comprendre son intérêt dans le cadre de la lutte contre la variabilité induite par le contexte VUCA. Historiquement, les performances du lean manufacturing sont remarquables. (Pavnaskar et al., 2003) relèvent des améliorations d'un grand nombre d'indicateurs opérationnels (OTD >99% ; réduction de stock jusqu'à -75%, amélioration de la qualité +50%, réduction des temps de changements d'outils -80 à -90%...). Ces résultats sont globalement confirmés par l'étude de (Negrão et al., 2016) qui notent une large majorité d'effets positifs obtenus avec les outils lean. Cependant on peut légitimement se poser la question de la pertinence dans le contexte VUCA de cette philosophie qui élimine les gaspillages, prônent le flux tendu et la réduction des stocks.

Le lean manufacturing offre une flexibilité au système de production qui lui permet de réagir rapidement aux contraintes de l'environnement. Le changement rapide d'outils (Single Minute Exchange of Die) et la polyvalence sont des outils qui contribuent à la flexibilité du système productif et donc à son adaptation à une variété de la demande même forte (APICS). La maîtrise statistique des procédés et le 6 sigma sont des outils qui permettent de réduire la variabilité interne. En fiabilisant les performances des process et des produits, le lean peut contribuer à lutter contre la variabilité externe en évitant l'ajout de contraintes internes et donc en facilitant les opérations de planification.

Si la philosophie lean contribue à la flexibilisation des systèmes de production et à la fiabilisation du processus de planification, elle n'est pas forcément adaptée à des contextes de forte variabilité (Suri, 2010). La crise COVID en a démontré les limites face une crise d'ampleur mondiale. La limitation des stocks à tous les niveaux des supply chains industrielles a contribué à leur désorganisation et à certaines pénuries de produits

industriels et de grande consommation. Même si la partie amélioration continue n'est pas remise en cause, la limitation des stocks dans un contexte fortement incertain pose question. De nombreuses publications professionnelles et grand public l'ont accusée d'être responsable de la désorganisation liée à la crise (<https://www.sante-et-travail.fr/failles-du-lean-management-pleine-lumiere>; <https://lundi.am/Coronavirus-une-biologistique-des-corps>; https://www.liberation.fr/debats/2020/04/02/le-covid-19-revelateur-de-la-tragedie-du-flux-tendu_1783843/; <https://www.aft-dev.com/actualites/tendances-logistique-post-covid>; <https://www.lesechos.fr/industrie-services/industrie-lourde/cette-guerre-des-stocks-qui-frappe-lindustrie-en-plein-rebond-1305941>). Cependant, on ne trouve que peu d'études chiffrées démontrant clairement le rôle des niveaux des stocks bas. La désorganisation industrielle résultant de la crise COVID semble multifactorielle (les confinements, l'absentéisme tournant, la fermeture des frontières, interdépendance des économies...), le niveau de stock n'est pas seul en cause mais est probablement un facteur aggravant.

Malgré la controverse, les praticiens du lean soutiennent que l'approche apporte des solutions permettant d'assurer la résilience en cas de crise (<https://www.institut-lean-france.fr>, <https://campuslean.com>). L'étude de (Farissi et al., 2021) portant sur l'utilité des pratiques lean pour surmonter la crise COVID dans le cas des entreprises marocaines corrobore ces affirmations. Plusieurs autres auteurs étudient l'utilisation et/ou l'aménagement des pratiques lean en temps de crise COVID

En conclusion, la philosophie lean permet de réduire la variabilité interne en stabilisant les processus et semble contribuer à la résilience en cas de crise modérée. Elle permet également de faire face à une variété importante de produits ayant des temps opératoires proches grâce au SMED. Cependant, d'après (Suri, 2010), elle n'est pas adaptée à une trop grande variabilité de la demande ce qui implique que les volumes soient relativement stables.

Le pilotage en temps réel grâce aux jumeaux numériques

Le jumeau numérique est un concept fortement lié à l'émergence de l'industrie 4.0 pour laquelle il constitue un outil de base. D'après (Kritzinger et al., 2018), sa définition a été posée par Grieves en 2002 lors d'une présentation concernant le Product Lifecycle Management, il était alors nommé « *Conceptual Ideal for PLM* ». Pour (Grieves and Vickers, 2017) le concept comprenait déjà « *l'ensemble des éléments définissant un jumeau numérique : l'espace réel, l'espace virtuel, le lien pour le flux de données de l'espace réel vers l'espace virtuel, le lien pour le flux d'informations de l'espace virtuel vers l'espace réel et les sous-espaces virtuels* ».

D'après (Kritzinger et al., 2018), Les jumeaux numériques sont des contreparties informatisées d'un système réel qui permettent de prendre des décisions basées sur des données en temps réel. Pour (Negri et al., 2017), le jumeau numérique « *consiste en une représentation virtuelle d'un système de production qui est capable de fonctionner avec différentes technologies de simulation qui se caractérise par la synchronisation entre le système virtuel et le système réel, grâce aux données détectées et aux objets connectés, aux modèles mathématiques et à l'élaboration de données en temps réel.* ».

Les origines du concept du jumeau sont d'abord physiques puis numériques issues du domaine aéronautique, mais il trouve des applications fortes dans le domaine de la gestion du système de production (Kritzinger et al., 2018; Negri et al., 2017; Rosen et al., 2015). Le jumeau numérique est une représentation de haute-fidélité du système physique auquel il est relié en temps réel. Ainsi, il permet de simuler des décisions et donc de choisir les meilleures options ce qui permet de saisir des opportunités notamment dans le domaine de la planification (Rosen et al., 2015). Pour les auteurs, le jumeau numérique permet de prendre de décisions rapides en fonction des perturbations qui interviennent lors de la fabrication, il permet également d'effectuer la planification de nombreux ordres et d'effectuer des opérations de rescheduling sans difficulté.

Dès lors, grâce à leur puissance, les jumeaux numériques pourraient être une solution attractive dans le cadre de la lutte contre la variabilité. Cependant, (Tao and Zhang, 2017) indiquent que le principal enjeu dans ce contexte est de pouvoir maintenir un système virtuel représentatif tandis que le système physique est soumis à la variabilité

Optimisation dynamique

Selon (Cruz et al., 2011), « un problème d'optimisation dynamique (DOP) est défini comme étant un problème dont la fonction-objectif et/ou les contraintes varient dans le temps ». (Fu et al., 2014) remarquent que pendant longtemps ils ont été considérés comme une suite de problèmes d'optimisation statique (SOP) et proposent au contraire de les différencier car ils impliquent une suite de décisions prises au fil du temps mais dépendantes les unes des autres (Bosman, 2007). Les temps de calcul pour explorer l'ensemble des solutions sont souvent rédhibitoires, l'objectif de ce type d'optimisation est clairement de choisir des solutions proches de l'optimum le plus rapidement possible face à des conditions et des objectifs changeants dynamiquement.

Pour (Cruz et al., 2011; Lepagnet et al., 2009; Mavrovouniotis et al., 2017; Nguyen et al., 2012), de nombreux problèmes du monde réel sont des problèmes d'optimisation dynamique qui comportent les caractéristiques précédemment citées. Pour (Mavrovouniotis et al., 2017), des applications ont été trouvées pour des problèmes d'ordonnancement. (Chibani et al., 2018) ont quant à eux appliqué cette approche dans le cadre de l'approvisionnement des supply chains agiles. (Cruz et al., 2011) établissent un classement des utilisations basé sur le type de cas (réel ou cas d'étude) mais également les méthodologies utilisées pour résoudre les problèmes. Ils notent que les méthodes évolutionnaires sont les plus populaires même si d'autres méthodes peuvent également contribuer à la résolution des DOP.

Pour (Nguyen et al., 2012), le système de production est soumis à différents types d'incertitudes : arrivée de nouvelles tâches, pannes des machines, changements dans les conditions économiques et financières, et variance des ressources disponibles. Pour (Ouelhadj and Petrovic, 2009), ces perturbations peuvent justifier le recours à l'optimisation dynamique dans le cadre de l'ordonnancement pour atteindre des performances proches de l'optimalité. Leurs conclusions confortent l'idée que l'optimisation dynamique peut apporter des solutions intéressantes dans le contexte VUCA. Cependant, toujours selon les auteurs, toutes les méthodologies employées ne conduisent pas aux mêmes résultats. Les méthodes purement réactives et celles basées sur un ordonnancement hiérarchique et centralisé ou conduisant à la production d'un nouvel ordonnancement introduisent de la variabilité néfaste à la performance du système productif et ne sont pas adaptées aux environnements hautement complexes.

L'ensemble des approches étudiées pour adapter le système de production au contexte VUCA, quel que soit le niveau de décision concerné, apportent des solutions intéressantes dans le contexte VUCA. Cependant, la plupart comportent des contraintes ou ont un rayon d'action limité.

L'adaptation du système de pilotage de la production peut offrir une alternative intéressante car elle offre une **approche globale**, i.e. agissant potentiellement sur l'ensemble des niveaux décisionnels Elle donc compatible avec la vision systémique de l'entreprise présentée au Chapitre I. L'intérêt de ce type d'approches est confirmé par l'émergence de nouveaux modèles depuis plusieurs années.

Nous approfondissons cette approche en présentant les généralités concernant le système pilotage de la production ou PPC ainsi que les principaux PPC existants. Plusieurs auteurs notent l'importance d'adapter le PPC au contexte industriel. Nous nous attacherons donc à répertorier les différentes caractéristiques du contexte industriel susceptibles d'influencer le choix du PPC et concluons par une synthèse permettant de positionner les PPC en fonction de ces dernières.

II-3 Le système de pilotage de production : Production Planning and Control systems (PPC)

Adapter ou changer le système de pilotage de la production au contexte peut être une réponse au contexte VUCA. Nous réalisons ici une brève définition des systèmes de planification et de contrôle de la production (PPC), puis une présentation des principaux modèles et de ceux qui émergent depuis les années 2000. Nous présenterons leurs objectifs, leurs outils et leurs limites.

II-3.1 Définitions et périmètre

Les systèmes de pilotage de la production ou systèmes de planification et de contrôle de la production sont connus en anglais comme Manufacturing Planning and Control (MPC), Production and Inventory Control systems (PIC), Production Control Systems (PCS) ou encore Production Planning and Control (PPC) systems. Dans ce mémoire, nous utiliserons systématiquement ce 4^{ème} acronyme pour faire référence au système de pilotage de la production.

Les PPC sont davantage définis à travers leur rôle et processus que par une définition standardisée. L'objectif des PPC est de permettre à l'entreprise de répondre à la demande client tout en maximisant l'efficacité des ressources. Ainsi, [Olhager and Wikner \(2000\)](#) et [Wiendahl et al., \(2005\)](#) considèrent le PPC comme un ensemble de fonctions et d'outils qui sont mis en œuvre pour satisfaire la demande. Pour [Mcfarlane and Bussmann \(2000\)](#), le PPC « représente un ensemble de solutions aux différents problèmes de prise de décision qui se posent dans le domaine de la production ». Pour [Vollman et al \(1997\)](#), le PPC « fournit les informations pour gérer de façon efficace les flux de matières, utiliser efficacement les hommes et les équipements, il coordonne les activités internes avec les fournisseurs et communique avec les clients concernant les attentes du marché ». Les mêmes auteurs principaux dans [Jacobs et al \(2011\)](#) élargissent la définition en intégrant la notion de supply chain. Ils soulignent que le PPC ne prend pas de décision, mais qu'il fournit au manager les informations nécessaires à la prise de décision.

Concernant le périmètre fonctionnel des PPC, tous les auteurs ne proposent pas la même approche. D'après [Stevenson et al., \(2005\)](#), les décisions relèvent de plusieurs fonctions (processus) : la planification des besoins en composants, la gestion de la demande, la gestion de la capacité et l'ordonnancement et le séquençage des ordres de fabrication. [Jeon and Kim, \(2016\)](#) répartissent les problématiques à traiter entre celles qui relèvent du planning de production au sens large (*Gestion des installations industrielles, Planification de la capacité, Planification des OF, Planification des process, Lancement des OF, ordonnancement et contrôle d'exécution*) et celles relevant du contrôle de production (*Gestion de stock, Conception des processus de production, Gestion des achats et approvisionnement*).

Cette répartition entre tâches de planification et de contrôle est également celle retenue par [\(Anil Kumar and Suresh, 2008\)](#) qui présentent une vision répartissant 12 processus en 3 grandes fonctions (cf. [Figure II-2](#)) : (1) *le pre-planning* (ou macro level) qui inclut les choix en matière de conception de produit, de process, d'implantation d'atelier ainsi que la prévision de la demande, (2) *le planning (micro level)* incluant la planification des ressources à travers (Machines, Méthodes, besoins en composants et main-d'œuvre), la sélection des gammes (routing), estimation des temps de charges (estimating), ordonnancement (scheduling) et (3) le contrôle incluant le lancement des ordres de fabrication (dispatching), le suivi des ordres (expediting), le contrôle (inspection) et l'évaluation de la performance permettant l'amélioration continue du PPC.

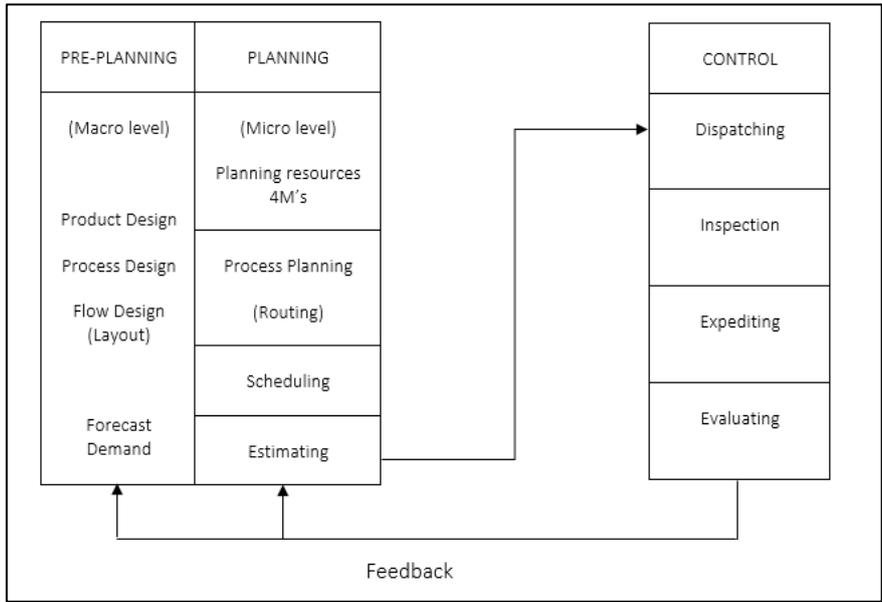


Figure II-2 PPC Schéma du PPC selon (Anil Kumar and Suresh, 2008)

Cette approche en 3 phases est également partagée par (Kiran, 2019). Cette vision, comme celle de Jeon et Kim (2016) est très extensive et comprend des processus appartenant à d'autres systèmes de l'entreprise comme vu dans le chapitre 1 tel que la conception des produits, des process de production ou l'organisation physique de l'atelier.

Berry and Hill (1992) et Jacobs et al. (2011)), quant à eux, en proposent une vision hiérarchisée, comprenant 11 processus, représentée par la Figure II-3.

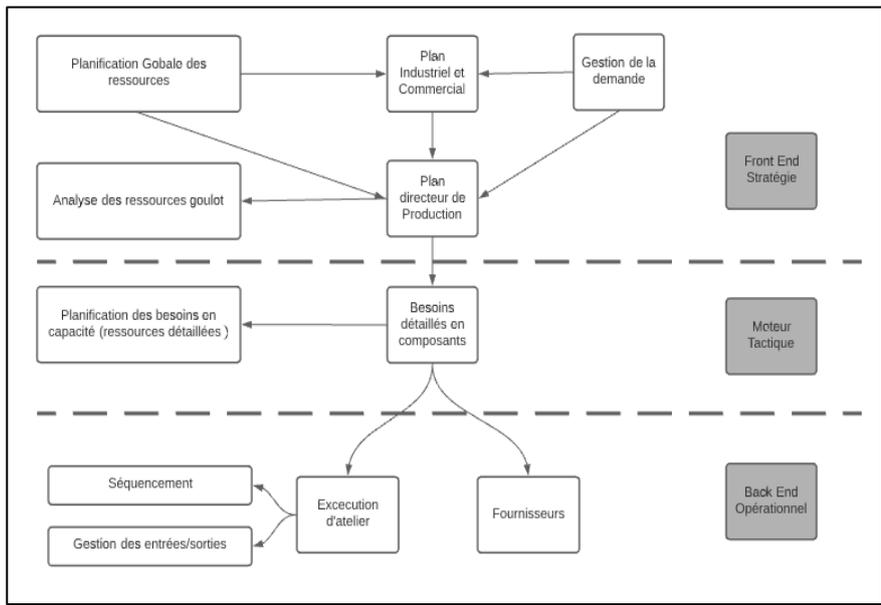


Figure II-3 Manufacturing Planning and Control system d'après Jacobs et al., (2011) et (Berry and Hill, 1992)

Cette vision est basée sur MRP2 et également utilisée par la plupart des logiciels de planification. Elle est donc largement acceptée dans le monde industriel. Elle répartit les processus selon l'horizon temporel concerné par chacun.

Le modèle Aachen de (Schuh and Stich, 2012) reprend les processus principaux, mais les répartit selon la nature des tâches (réseau, cœur de métier de la production ou transfonctionnelles) et intègre la gestion des données comme processus transverse.

(Lödding, 2013) utilise le modèle Aachen comme base pour sa proposition de modèle centré sur la partie contrôle du PPC. Il intègre, en plus des processus, les variables de contrôle et les objectifs poursuivis par le PPC. On notera qu'il se réfère au WIP, au temps de traversée (Throughput time), au taux de charge (Utilization) et à la fiabilité du planning pour évaluer la performance du PPC.

Les approches des PPC sont diverses sur la forme (degré de détail, identifications et répartition des processus, hiérarchisation, mesure de la performance) et sur le périmètre fonctionnel, mais elles s'accordent toutes sur l'objectif général à savoir répondre à la demande du marché en planifiant la production, les ressources et les approvisionnements au sens large. On peut cependant distinguer 2 types d'approches : celles qui sont centrées sur les processus récurrents du PPC et celles qui intègrent également les processus ponctuels comme la conception de produits ou de process par exemple.

Il existe plusieurs PPC traditionnels, nous en faisons une brève présentation, dans le paragraphe suivant, permettant de les comprendre et de les positionner. Nous nous focaliserons sur les points essentiels et non sur les détails méthodologiques de chaque PPC. Un tableau récapitulatif des principales caractéristiques de ces PPC est présenté en fin de paragraphe afin de pouvoir les comparer rapidement.

II-3.2 Principaux PPC

L'objectif de ce travail est de situer les principaux PPC, nous présentons ici leurs concepts clés, sans prétendre à une étude exhaustive. Nous avons répertorié les principaux systèmes utilisés par les entreprises et les plus populaires dans la littérature académique. Nous ne traiterons que des systèmes de base et non des déclinaisons qui ont pu émerger.

MRP2

Généralités

Material Requirement Planning (MRP), développé Orliky (1975), est une méthode de planification hiérarchisée qui avait pour but de lier directement les besoins en composants et matières premières à la demande des produits finis par le biais d'étapes successives de planification. Mais MRP est un système à capacité infinie ce qui ne permet pas d'avoir une planification efficace, les ordres proposés ne tenant pas compte de la disponibilité des ressources.

Dès les années 80, Manufacturing Resource Planning (MRP2) est popularisée par Wight et al., (1984). Cette approche reprend les principes de MRP, intègre le calcul des besoins en ressources aux différents stades de la planification. L'objectif est de réaliser un plan de production réalisable répondant à la demande prévisionnelle ou ferme du marché. Dans la phase plan stratégique on peut intégrer plusieurs hypothèses ou tendances de marché ce qui permet d'établir des alternatives.

Aujourd'hui MRP2 est le système le plus utilisé et s'appuie sur l'utilisation de progiciel de gestion intégrée (ERP).

Les objectifs

D'après Vollmann et al., (1997), l'objectif est de « fournir le bon composant au bon moment pour respecter les dates de livraisons des produits finis ». On peut donc considérer que MRP2 est un PPC « Time Phased » c'est-à-dire que l'entreprise cherche à respecter des dates de mise en fabrication afin de synchroniser les opérations en fonction de la date attendue par le client. Pour Zäpfel and Missbauer, (1993), il s'agit de contrôler les flux de composants et produits en intégrant les plans marketing, financiers et industriels.

À l'origine, selon Guide and Srivastava, (2000) MRP2 est un système censé empêcher le stockage puisqu'il répond en quantité juste et en juste à temps aux demandes clients. Pour Gupta et Snyder, (2009), il

s'oppose en ce sens aux méthodes de réapprovisionnement basées sur la quantité économique. Dans la réalité de nombreuses entreprises utilisent des stocks et/ou des temps de sécurité en vue d'absorber les différents types de variabilité pouvant compromettre le respect du délai client.

Outils

MRP2 s'appuie est un système hiérarchisé présenté dans la Figure II-1 . Il mobilise plusieurs outils qui sont exécutés successivement qui permettent de vérifier l'adéquation charge/capacité à chaque étape.

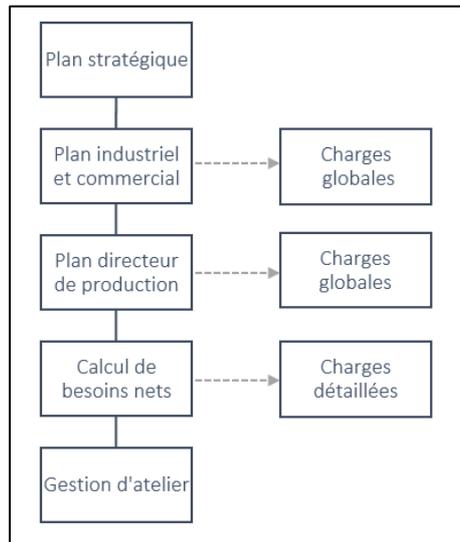


Figure II-4 Schéma global de la démarche MRP2

Le processus MRP2 est donc séquentiel et itératif c'est-à-dire qu'on réalise les calculs à chaque étape, la faisabilité est vérifiée avant le passage au niveau suivant. Si au niveau suivant qui est forcément plus détaillé, le plan n'est pas réalisable, on remonte à l'étape précédente. Ce processus itératif peut être fastidieux et nécessite encore souvent des heures de calculs ce qui ne permet pas toujours une mise à jour en temps réel.

Une fois les dates de livraison des produits finis validées, les dates de lancement des ordres de fabrication des produits finis sont déterminées dans le Plan Directeur de Production par un processus de « backward scheduling ». La date de démarrage est obtenue à partir de la date de livraison voulue en remontant le temps avec le lead time prévisionnel c'est-à-dire le temps total écoulé entre le lancement d'un ordre et la mise à disposition du produit en incluant les temps opératoires, de setup, d'attente et de transfert éventuels. Lors du Calcul de Besoins Nets, le processus est réitéré pour tous les composants de la nomenclature en partant des dates de mise à disposition attendue des articles de niveaux supérieurs.

MRP2 étant un PPC basé sur les prévisions, les produits souffrant d'une forte variabilité génèrent une quantité importante de modifications du planning de production.

MRP2 permet de planifier la production dans un environnement complexe à condition d'obtenir les données nécessaires, mais ne permet pas de garantir que les décisions prises soient optimales. Notons que d'après (Porter et al., 1999) MRP2 était plutôt réservé aux grandes entreprises qui avaient les moyens de financer les logiciels, la création de solutions adaptées aux PME a remis en cause ce constat. Les modèles d'optimisation de MRP2 travaillent essentiellement sur les tailles de lot, les stocks de sécurité et les délais de planification.

Lean Manufacturing et Kanban

La méthode des **Kanbans** est le PPC intégré dans la philosophie de production **Juste à Temps**, élément du Toyota Production System qui vise à éliminer toutes les formes de gaspillages. L'objectif est de répondre efficacement et effieiemment à une demande qui peut être très variée). L'objectif de performance est clairement la **maîtrise du stock total et le service au client**. Ce système a été développé dès les années 50 au

Japon par Taïchi Ohno qui le formalisera dans son ouvrage en 1988 (Ohno, 1988). Comme évoqué précédemment, le juste à temps a évolué au fil du temps et a été popularisé en occident par l'ouvrage de (Womack et al., 1990), il est aujourd'hui intégré dans la philosophie Lean Manufacturing qui comporte un certain nombre d'outils et de méthodes visant notamment l'amélioration continue. (Sendil Kumar and Panneerselvam, 2007), proposent une revue de littérature sur les systèmes Kanban visant à faire le point sur l'état à date de la recherche.

L'un des outils majeurs de cette philosophie est le système Kanban qui permet le contrôle de la production. Ce terme signifie « étiquette », chaque kanban comporte des informations sur la référence qu'il représente. Dans sa forme la plus simple, un Kanban est alloué à chaque container, la consommation des pièces du container déclenche la remontée de l'étiquette vers le poste amont et déclenche la production (cf. Figure II-5). On définit Kanban comme un mode de gestion d'atelier en flux tiré car le lancement des ordres se fait soit directement par une commande client qui déclenche la remontée des kanbans soit par une consommation d'un stock elle-même due à la demande réelle.

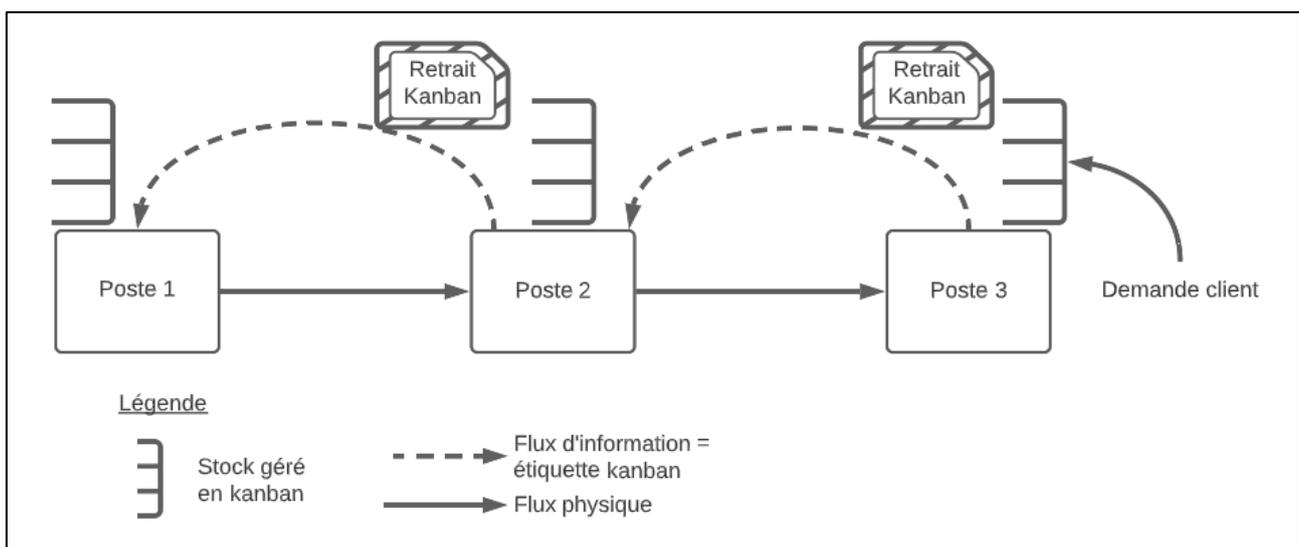


Figure II-5 Représentation d'un système Kanban simplifié

Ce système est l'initiateur des systèmes dits « à cartes » et entre dans la catégorie des systèmes de planification à rechargement et à quantité fixe.

Contrairement à MRP2, les prévisions n'interviennent pas directement dans le système de planification, mais permettent, en amont, de déterminer le volume de cartes nécessaires au fonctionnement du système productif. Ce nombre de cartes en circulation dans l'atelier définit les stocks et les en-cours qui apparaissent alors comme l'un des objectifs de l'optimisation de cette méthode.

Concernant les limitations de Kanban, pour (Suri, 2010), ce PPC n'est pas très adapté aux environnements variables. L'étude de Chan (Chan, 2001) montre quant à elle que l'augmentation de la taille des Kanban dans le contexte mono produit conduit une baisse de leur performance contrairement aux résultats en contexte multi produits. Selon eux, la cause peut être attribuée aux temps de setup qui deviennent problématiques.

CONWIP

L'acronyme est utilisé pour définir le système CONstant Work In Process. Ce système est développé par Spearman et al., (1990) comme une alternative au Kanban quand l'environnement de production devient trop complexe. Les auteurs s'appuient sur les conclusions de Hall (1981) qui limite l'applicabilité de Kanban à la « production répétitive » et souhaite proposer une alternative Pull à MRP2 qui soit applicable à davantage d'environnements productifs que le système Kanban.

CONWip est un système à cartes dont le nombre est déterminé par le niveau d'en-cours de la totalité du système productif considéré et non par le niveau de stock souhaité par référence comme pour Kanban. Les auteurs s'appuient sur la loi de (Little, 1961) qui définit le temps de cycle total comme étant le rapport entre le WIP moyen et le throughput. Pour eux, la maîtrise du WIP permet la maîtrise des temps de cycle et donc la maximisation des ventes. Leur étude simulatoire montre un gain de 3,2% par rapport à un système en flux poussés classique.

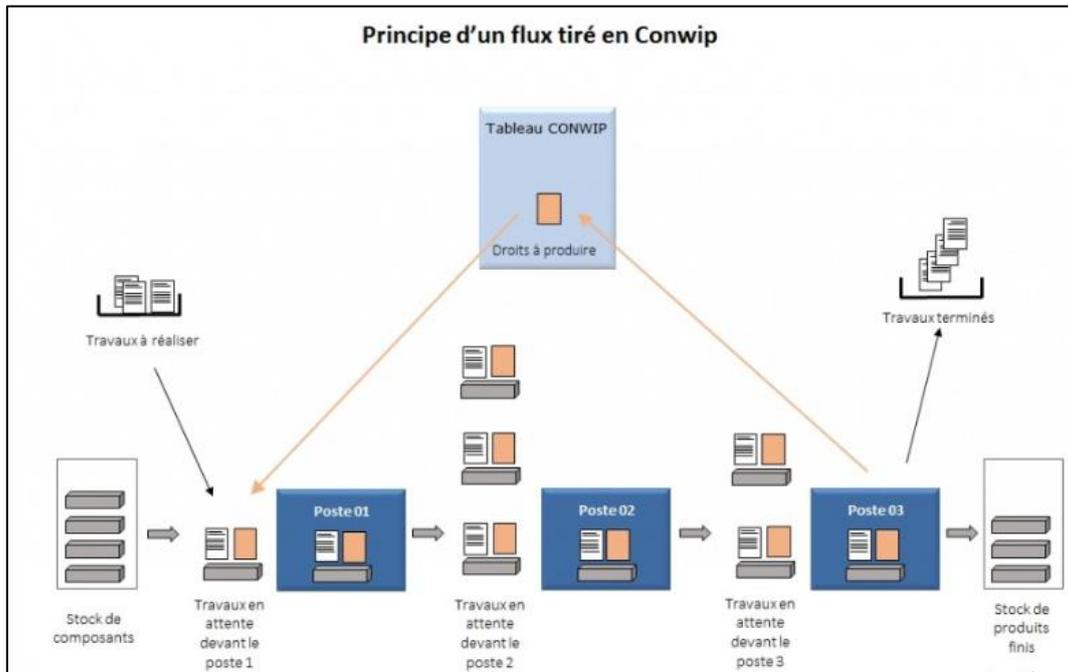


Figure II-6 Représentation d'un système Conwip source conwip.com

Concrètement, un nombre de cartes total est calculé, il représente le WIP maximum possible. Les ordres sont généralement issus d'un système MRP2 classique cependant les ordres ne peuvent être lancés que si une carte est disponible. Une fois que toutes les cartes sont utilisées, les ordres suivants doivent attendre qu'une carte se libère c'est-à-dire qu'un ordre en cours soit achevé. L'objectif de ce PPC est donc clairement la maîtrise du WIP qui permet de maîtriser les lead times et donc augmente le respect des dates de livraisons client. Le fonctionnement général est illustré par la Figure II-6.

(Jaegler et al., 2018), dans une revue de littérature, définissent les 3 principales thématiques de recherche autour de CONWIP à savoir la définition du nombre de cartes, la définition du WIP et le nombre de boucles CONWIP. Les choix de paramétrage sont donc nombreux et ont également une influence sur la performance du système. Ils identifient également que le système s'adapte effectivement à des systèmes de production plus complexes que Kanban notamment aux environnements MTO, aux job shops ou, plus généralement, qui ne sont pas adaptés à la logique Takt Time (mix produits important avec des temps opératoires très variables ou contexte de forte variabilité).

Théorie des contraintes (TOC) et Drum-Buffer-Rope

L'origine de la Théorie des Contraintes remonte aux années 70 avec le développement d'un logiciel de d'ordonnancement « Optimized Production Technology » dont **l'objectif est d'améliorer l'ordonnancement au poste goulot afin de maximiser le throughput** c'est-à-dire la maximisation des revenus issus de la vente de la production. (Gupta and Snyder, 2009; Thüerer et al., 2020). La TOC a été formalisée par Goldratt et popularisée en France dans son livre de 1984 « Le But » (Goldratt and Cox, 1993). Comme pour le JAT, il s'agit d'une philosophie de production qui s'appuie sur **l'idée que la performance d'un système de production repose sur celles imposées par ses contraintes**. Ces dernières peuvent être dues à des limitations de ressources ou de la demande, de la disponibilité des composants... (Zäpfel and Missbauer, 1993).

TOC s'appuie sur le PPC nommé Drum-Buffer-Rope (DBR). DBR a pour objectif **de focaliser l'effort d'ordonnement des ordres de fabrication sur le poste goulet**. Ce goulet est protégé par un buffer c'est-à-dire un stock de composants qui doit permettre au goulet d'être approvisionné en continu. Toutes les autres ressources sont subordonnées au goulet : celles situées en amont fonctionnent sur une base Kanban c'est-à-dire que les ordres sont déclenchés en fonction de la consommation réelle du buffer situé devant le poste goulet, celles situées en aval sont planifiées sur une base MRP en fonction des dates prévues au goulet.

D'autres buffers sont également présents notamment pour protéger le client et maximiser les ventes. Le positionnement et le rôle de ces buffers ont fait l'objet de différents travaux notamment ceux de (Schrageheim and Ronen, 1990).

Comme pour Conwip, DBR s'appuie sur les ordres de fabrication générés par un autre PPC tel que MRP2. Son périmètre fonctionnel est donc limité à la partie ordonnancement et suivi des ordres. Il n'intervient pas dans la phase de détermination des ordres.

Quick Response Manufacturing et POLCA

Le Quick Response Manufacturing ou QRM est une philosophie de production inventée par (Suri, 1998) qui s'inscrit dans la suite du Time Based Competition (Stalk, 1988). Comme décrit par (Godinho Filho and Veloso Saes, 2013), l'idée centrale est de **satisfaire les consommateurs en réduisant les délais dans un environnement de haute variété des produits**.

Cette méthode s'appuie sur le système POLCA (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) pour la gestion des ordres dans les systèmes de production organisés en cellules. D'après (Riezebos, 2010), POLCA s'inspire des systèmes Kanban et CONWIP. L'objectif est de **contrôler et de synchroniser les flux entre les cellules tout en maîtrisant l'en-cours**.

D'après l'exemple de (Suri, 2010), dans une organisation de type jobshop, si 2 cellules (A et B) partagent un flux, on crée une boucle POLCA qui comporte des cartes (A/B) autorisant la production de produits utilisant la cellule A puis la cellule B. A ne peut fabriquer des produits à destination de B que si des cartes A/B sont libres. Une fois les opérations terminées vers A, l'ordre de fabrication (OF) est envoyé vers B avec la carte POLCA. B ne renverra la carte que lorsque l'ordre sera terminé, signifiant à la cellule A qu'elle dispose de capacité.

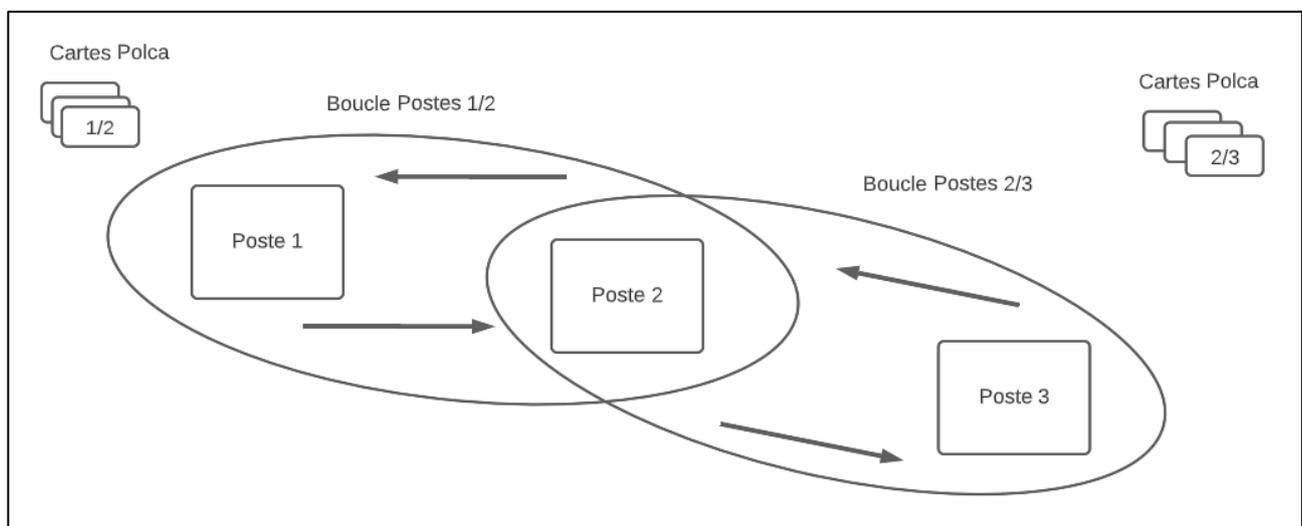


Figure II-7 Boucle POLCA d'après Suri 2010

Suri 2010 souligne le fait que la carte POLCA est un **signal de capacité**, comme Conwip, et contrairement à Kanban qui est un signal de stock. **La maîtrise du niveau d'en-cours (ou WIP) devrait permettre de s'assurer du respect des délais**.

Concernant l'ordonnancement au poste, il est fait en fonction des dates issues du système MRP. Les ordres ne peuvent pas être lancés avant la date prévue. POLCA est donc, comme DBR, un **PPC focalisé sur la partie contrôle** du périmètre PPC et s'appuie sur MRP pour la planification.

D'après (Stevenson et al., 2005), c'est un PPC qui combine les approches push et pull qui met l'accent sur la réduction des temps et la maîtrise de la capacité à 70-80% pour permettre une flexibilité dans la production.

Autres approches

Toutes les principales approches qui ont été décrites, ont été créées il y a plusieurs dizaines d'années, mais continuent d'être largement utilisées. Néanmoins, l'évolution du contexte économique conduit de nombreuses entreprises et chercheurs à développer de nouvelles approches pour améliorer la performance des systèmes productifs. (Bagni et al., 2021) en font une synthèse présentée dans le [Tableau II-3](#).

Tableau II-3 Tableau des 13 PPC créés depuis les années 2000 d'après (Bagni et al., 2021)

Système	Acronyme	Année	Références principales	Variable de contrôle principale	Niveau de centralisation	Applicabilité au type de flux	Systèmes à cartes	Types d'autorisation
Inverse Base Stock	IBS	1999	Masin 1999	WIP	Centralisé	Flowshop	Oui	1
Constant Load	CONLOAD	1999	Rose (1999)	WIP	Centralisé	Flowshop	Non	1
Customize Token-based system	CTBS	2000	Gaury, Pierreval, and Kleijnen (2000)	WIP	Hybride	Flowshop	Oui	N(simultanees)
Double Speed Single Production Line	DSSPL	2000	Stagno, Glardon, and Pouly (2000)	WIP	Centralisé	Flowshop	Partielle	2
Decentralised Work in Process	DEWIP	2000	Lodding and Wiendahl (2000)	WIP	Décentralisé	Jobshop	Non	1
Behaviour Based Control	BBC	2001	Paternina-Arboleda and Das (2001)	WIP	Hybride	Flowshop	Oui	3 (simultanees)
Gated MaxWIP	G-MaxWIP	2002	Grosfeld-Nir and Magazine (2002)	WIP	Centralisé	Flowshop	Oui	1
Parallel Pull Flow	PPF	2004	Hunter et al. (2004)	WIP	Centralisé	Flowshop	Oui	1
Control of Balance by Card Based Navigation	COBACABANA	2009	Land (2009)	WIP	Centralisé	Jobshop	Oui	1
Demand Driven Materials Requirement Planning	DDMRP	2011	Ptak and Smith (2011)	Throughput	Centralisé	Jobshop	Partielle	2
Basestock Kanban-Constant Workin- Process	BK-CONWIP	2012	Onyeocha and Geraghty (2012)	WIP	Hybride	Flowshop	Oui	3 (simultanees)
REDUTEX		2016	Serrato (2016)	Throughput	Centralisé	Flowshop	Partielle	1
Basestock-Constant Work-in-Process	B-CONWIP	2018	Hawari, Qasem, and Smadi (2018)	WIP	Centralisé	Flowshop	Oui	2 (simultanees)

Nous ne détaillerons pas ces approches mais nous en précisons les principales caractéristiques.

Concernant les objectifs, on remarque globalement que la très grande majorité s'attache à la maîtrise du WIP. Cet objectif démontre certainement une volonté de maîtriser les délais et donc de préserver la performance client mais également financière en évitant l'explosion des en-cours. Seuls DDMRP et Redutex vise la maximisation du throughput i.e., d'après (Hopp and Spearman, 2011), « la production moyenne d'un processus de production (machine, cellule, ligne, usine) par unité de temps ».

En ce qui concerne, la gestion de ces PPC, la plupart sont centralisés et 8/13 sont des systèmes à cartes.

Concernant les domaines d'application, le domaine du flowshop est dominant.

Les auteurs concluent sur le fait que la plupart de ces propositions ne sont que peu documentées et leurs performances sont par conséquent difficiles à évaluer. Parmi les nouveaux PPC, DDMRP affiche clairement la volonté de faire face à l'environnement VUCA en offrant une nouvelle approche.

Focus sur la méthode DDMRP

Ptak et Smith, praticiens de la gestion industrielle, constatent dans les années 2000 une efficacité partielle des PPC traditionnels face aux nouveaux enjeux économiques. Pour eux, **tenter d'améliorer les méthodes existantes ne suffira pas à s'adapter aux exigences du contexte VUCA et à répondre aux nouveaux critères de performance.**

Ils développent et proposent donc une **nouvelle approche, dite Demand Driven MRP (DDMRP)**. Leur objectif est de **s'accorder de la variabilité inhérente** au contexte économique plutôt que de lutter contre elle. Ils argumentent que le contexte VUCA rend la demande tellement imprévisible qu'il vaut mieux éviter d'assoir le processus de planification sur des prévisions qui s'avèreront forcément fausses. Leur approche est donc focalisée sur la demande réelle d'où son appellation « Demand driven » traductible par « pilotée par la demande ». Les prévisions ne sont utilisées que dans le cadre du dimensionnement.

D'après les auteurs, « *il s'agit d'une méthode formelle de planification multi-échelon et une méthode d'exécution qui protège et promeut le flux d'information pertinente grâce à l'établissement et au management de stocks de découplage placés stratégiquement* ». Il s'agit d'une méthode couplant la planification et le suivi d'atelier.

La base de leur réflexion est l'utilisation de **points de découplage** qui doivent permettre d'éviter la propagation de la variabilité au sein du flux. La notion de découplage n'est pas nouvelle et était déjà évoquée par (Sharman, 1984) sous l'appellation Point de pénétration de la commande. (Hoekstra et al., 1992; Olhager, 2003), reprennent cette approche pour définir le point de découplage qui s'apparente au point où l'on passe d'une fabrication sur stock à une fabrication tirée par la demande. Un certain nombre d'auteurs ont travaillé sur le positionnement du point de découplage (Mason-Jones and Towill, 1999; Wemmerlöv, 1984) mais cette vision d'alternance entre flux poussé et flux tiré n'est pas celle adoptée par Ptak et Smith qui adoptent la définition de l'APICS : « *emplacement dans la nomenclature ou un réseau de distribution où l'on place un stock afin de créer une indépendance entre les processus ou entités* ». Dès lors plusieurs points de découplage peuvent être utilisés au sein de la même nomenclature.

Au sein de DDMRP, les stocks de découplage sont appelés des buffers de stock. Si leur utilisation n'est pas nouvelle, DDMRP apporte un cadre méthodologique pour leur dimensionnement et leur pilotage :

- **Une méthodologie de dimensionnement** prenant en compte la variabilité et faisant appel à 3 niveaux gérés avec des codes couleurs. Un niveau maximal de stock qui constitue le niveau de réapprovisionnement
- **Une mise à jour dynamique et automatique du dimensionnement** basée sur la consommation moyenne journalière
- **Un nouveau mode de calcul des besoins** appelé l'Équation de Flux Net qui ne prend en compte que les éléments réels (demande du jour, retards éventuels, approvisionnement en cours)
- **Un système de pilotage et d'exécution inédit** qui inclut l'utilisation de codes couleurs et d'un indicateur de **priorisation** objectif qui facilite les arbitrages.

À chaque point de découplage, les besoins sont calculés à partir d'un système à seuil de déclenchement, ce qui classe **DDMRP parmi les systèmes de gestion de stocks à seuil et quantité variable**. Les auteurs s'appuient sur MRP2 pour calculer les besoins de produits non bufferisés.

Ptak et Smith déploient également une **vision de la performance centrée sur les flux et non plus sur les coûts unitaires**. Pour eux, la **maximisation de la rentabilité se fait par l'augmentation de la vitesse des flux et non par la réduction des coûts unitaires**. Il s'agit d'accélérer les flux pour réduire le cycle financier et améliorer la rentabilité. Leur réflexion se base sur la loi de Plossl (Plossl, 1991) qui énonce que « *les bénéfiques sont directement liés à la vitesse des flux physiques et d'information* ». Sur ce point, ils s'inscrivent dans la lignée de la théorie des contraintes (TOC) développée par Goldratt et Cox (1993). Pour eux, l'un des 3 indicateurs

majeurs de la performance industrielle est le throughput qui est pour eux la vitesse flux issu du système qui repose sur la capacité à servir le client.

Selon les auteurs, la méthodologie permet également d'améliorer d'autres indicateurs de performance tels:

- La rentabilité,
- La performance client mesurée par le « On Time Delivery » ou (OTD),
- La baisse des stocks et des en-cours,
- La baisse de délais de réponse au client,
- La réduction des cycles.

Bien qu'il repose sur des concepts connus, DDMRP apparaît comme un **PPC original censé répondre à l'environnement VUCA. Il propose une nouvelle méthodologie de planification et de suivi des ordres ainsi qu'une vision de la performance**, inspirée de la méthode TOC, basé sur les flux et non sur les coûts. Notons que nous ne partageons pas l'analyse de (Bagni et al., 2021) qui le présente comme un système basé sur des cartes. En effet, tel que décrit par les auteurs de la méthode, l'utilisation de cartes ne fait pas partie de la méthodologie. Il se peut cependant que dans le cadre de mise en place chez des industriels des aménagements aient été apportés à la version initiale.

Les principaux PPC présentent tous des aspects originaux, des avantages et des inconvénients. Le **Tableau II-4** synthétise leurs principales caractéristiques mais ne se veut pas exhaustif. Il s'agit avant tout d'établir un panorama des principaux PPC. Notons que pour DDMRP nous ne disposons que de peu d'informations et que le tableau est rempli avec le descriptif de la méthodologie réalisé par les auteurs.

Tableau II-4 Grille de répartition des modes de production par type

	MRP2	Kanban	DBR	CONWIP	POLCA	DDMRP
Stratégie de réponse à la demande	MTO-ATO-MTS	ATO-MTS	ATO	Mixte	MTO	tous
Modes de contrôle de l'atelier (poussés/tirés)	Poussés	Tirés	Mixte	Mixte	Mixte	Tirés
Modèle de gestion de stock	Périodique, quantité variable	Continu, Quantité fixe	Continu, quantité fixe	Continu, quantité variable	Continu, quantité variable	Continu, quantité variable
Contrôle du flux	Time phased	Rate based	Rate based	Rate based	Time phased	Time Phased
Objectif	Respect des dates	Maîtrise du stock	Maximisation du throughput	Contrôle du WIP	Réduction du LT par la maîtrise de la capacité	Maximisation du throughput
Rôle des prévisions	Calcul de charge	Dimensionnement	Dimensionnement	Dimensionnement	Dimensionnement	Dimensionnement
Paramètres de design	LT, BOM	Consommation moyenne, temps opératoires et de transfert, durée de stockage, taux de rebut	Capacité du goulet	Nombre de tickets, taille de lot	nomenclature, LT	Demande moyenne LT, taille de lot, Facteur de délai Facteur de variabilité
Variable de décisions	Seuil, taille de lot, stocke de sécurité, LT	Utilisation des cartes		Utilisation des cartes		Position de l'équation de flux
Variabilité de la demande	À limiter	À limiter	Protection grâce au buffer		Opportunité	Intégrer dans le dimensionnement
Caractéristique principale de l'environnement	Complexe, Personnalisation forte	Peu variable, peu complexe (Suri, 2010)	Présence de goulet fixe (Stevenson et al., 2005) Complexe (Zäpfel and Missbauer, 1993)	Forte variété	PME Faible volume très forte variété	Adaptable à tous les environnements
Limitations	Modifications fréquentes de planning liés aux liens BOM	Peu adapté à la forte variabilité (Rocky Newman and Sridharan,	Goulets multiples ou changeants	Initialement Peu adapté aux jobshops	Fonctionne en collaboration avec MRP Scepticisme des managers	À préciser

		1995; Zäpfel and Missbauer, 1993)		Boucles trop longues ou se recouvrant (Bonvik et al, 1997)		
--	--	-----------------------------------	--	--	--	--

La plupart des caractéristiques retenues sont celles retrouvées fréquemment dans les descriptifs de PPC ou dans les grilles de choix.

Comme évoqué par (Hopp and Spearman, 2004), la définition des modes flux poussés et flux tirés est souvent ambiguë, un amalgame étant fait entre flux poussés=MTS et flux tirés=MTO. Les options Make to Order et Make to Stock sont des stratégies de réponse à la demande client. Il s'agit de définir si le client est servi sur stock ou bien si la commande déclenche tout ou partie du processus de fabrication. En effet, MTS et MTO sont des extrêmes cependant, il est possible d'avoir un système combinant les 2 en fonction du point de pénétration de la commande (Hoekstra et al., 1992). Ces choix ne sont pas des modes de contrôle de l'atelier, c'est-à-dire le *mode de libération des ordres de fabrication*.

En ce qui concerne le mode de libération des ordres, il existe donc 2 possibilités : flux tirés ou flux poussés. D'après (Bonney et al., 1999), les définitions et périmètre de ces deux modes sont très variables. Nous considérons dans le Tableau II-4, l'approche distinguant uniquement le choix de lancement des ordres. En flux poussés, les ordres sont envoyés dans l'atelier en fonction des dates établies dans le planning. En flux tirés, les ordres ne peuvent être lancés que si la production est autorisée, les mécanismes d'autorisation étant variables. Un système MTO est compatible avec un mode flux poussé : le client demande une date de livraison, l'entreprise peut éventuellement lancer les ordres en fonction des dates prévues et donc opter pour un mode flux poussés. Inversement un client peut être livré sur stock (MTS) et la production lancée qu'à partir du moment de la consommation du stock de produits finis.

Chaque PPC ayant ses propres caractéristiques, ils sont logiquement utilisés dans des contextes industriels différents. La problématique du choix du PPC est logiquement abordée par un certain nombre d'auteurs qui cherchent à définir leur pertinence face aux caractéristiques du contexte industriel. Nous nous pencherons d'abord sur les caractéristiques de l'environnement et de l'organisation industrielle et étudierons ensuite les différentes préconisations.

II-3.3 Adapter le PPC au contexte

Les entreprises ont le choix entre un nombre important de PPC qu'elles peuvent parfois utiliser conjointement i.e. MRP2+Kanban est une utilisation classique (Bonney, 2000). Plusieurs recherches ont été menées afin d'identifier les environnements productifs dans lesquels les PPC sont recommandés ou utilisables. Cette problématique du choix peut paraître désuète, mais face à l'émergence de nouveaux PPC et la transformation du contexte industriel, elle retrouve une légitimité vis-à-vis des entreprises qui cherchent des solutions pour faire face. Elle nécessite de pouvoir caractériser précisément le contexte industriel afin d'orienter les décideurs. Nous aborderons d'abord les caractéristiques prises en compte pour définir le contexte industriel avant de présenter différentes grilles de choix existantes.

Caractérisation du contexte industriel et de l'organisation de l'entreprise

D'après plusieurs auteurs (Chan and Burns, 2002; Olhager and Selldin, 2007; Van Dierdonck and Miller, 1980), il n'y a pas de meilleur PPC dans l'absolu, il faut qu'il soit adapté au contexte industriel et à l'organisation de l'entreprise.

La caractérisation du contexte industriel et de l'entreprise peut se faire à travers différents critères. Nous avons recensé une douzaine de publications traitant directement du sujet du choix du PPC ou de leur applicabilité en fonction de différents critères (Bironneau, 2002; Bonvik et al., 1997; Grünwald et al., 1989; Jaegler et al., 2018; Jodlbauer and Huber, 2008; Olhager and Wikner, 2000; Porter et al., 1999; Spearman et al., 1990; Stevenson et al., 2005; Wiendahl et al., 2005; Wikner and Rudberg, 2005; Wildemann, 1988; Zäpfel

and Missbauer, 1993). Par ailleurs, un certain nombre de publications comparent la performance de différents PPC dans différents contextes ce qui témoigne de l'intérêt qui peut être porté à la performance des PPC en fonction des contextes dans lesquels ils sont appliqués. Nous répertorions ici les différentes caractéristiques utilisées pour définir l'environnement industriel.

La stratégie de réponse à la demande

La stratégie de réponse à la demande est l'un des premiers points qui permet de caractériser le contexte industriel. Il existe 2 extrêmes :

- Piloter par l'amont, l'entreprise fabrique et livre sur stock. On parle de Make to Stock ou MTS. Le plus souvent elle s'appuie sur des prévisions, on parle parfois de Make to Forecast (MTF) qui n'est qu'une déclinaison du pur MTS pur, qui est assez rare dans les faits. C'est le cas des industries à feu continu (verrière, aciérie) qui ne peuvent pas arrêter les installations et difficilement réguler les quantités en deçà d'un débit minimum.
- Piloter par l'aval : l'entreprise attend d'avoir les commandes pour :
 - Concevoir le produit, approvisionner et fabriquer, on parle d'Engineering to Order ETO
 - Approvisionner et fabriquer on parle de Make to Order ou MTO
- Mixte : Assembler à la commande des semi-finis qu'elle a stockés, c'est le système Assemble To Order ou ATO qui combine les stratégies MTS et MTO.

D'après (Hoekstra et al., 1992), la différence entre ces différents systèmes repose sur le point de pénétration de la commande réelle dans le processus productif i.e. le point où le flux passe de « poussé » à « tiré par la demande ».

Le type de processus de production

Pour (Olhager and Wikner, 2000), on distingue 3 types de processus de production : les processus projet qui mettent en œuvre un produit unique, les processus discrets reposant sur la production intermittente et les processus continus. (Chapman, 2006) exclut les processus projet mais identifie lui aussi 3 types de processus : job process, batch et repetitive. (Berry and Hill, 1992; Porter et al., 1999) définissent 5 types de processus : Projet, jobbing, par lot, en ligne et continu.

- Le mode projet fait référence à la production un équipement tel qu'un ouvrage d'art qui est construit en place ou la fabrication industrielle d'équipements importants tels que les navires, ou les satellites pour lesquels la fabrication se fait en atelier au sein duquel ce sont les opérateurs qui se déplacent autour du produit. La taille des séries est par définition unitaire ou très faible.
- Jobbing production : d'après l'APICS c'est une organisation de production qui permet de fabriquer des produits en fonction des spécifications de chaque client. Les opérations sont conçues pour supporter un éventail de produits utilisant des machines génériques.
- Par lot (batch production) : production de lot de produits identiques sur différents types de ressources.
- En ligne : production de séries intermittente de produits suivant la même séquence de fabrication sur des ressources connectées ou non.
- Continu : la production est réalisée sur des lignes de production connectées qui ne peuvent pas être stoppées comme c'est le cas de la sidérurgie ou de la verrerie.

Cette classification a été approfondie par (Maccarthy and Fernandes, 2000) qui distinguent 7 types de processus en ajoutant les notions de répétitivité et de production de masse. Le choix du type de processus est réalisé en fonction du volume pour (Berry and Hill, 1992) et du volume et de la variété pour (Stevenson et al., 2005).

L'organisation physique de l'atelier

L'organisation physique de l'atelier est la plupart du temps une réponse au type de processus de production. Cependant, dans le cas des lignes de production, il n'y a pas vraiment d'alternative à une organisation de type Flowshop si ce n'est la connexion ou non des ressources entre elles.

Pour les productions discrètes les choix d'organisation sont plus nombreux : ligne discontinue flexible, organisation en îlots, en cellules autonomes ou en ateliers spécialisées.

L'organisation en poste fixe est uniquement utilisée dans le cas des produits volumineux rendant impossible le déplacement des produits.

Les caractéristiques de la demande

La plupart des auteurs se focalisent sur le volume de production comme critère de choix pour le PPC. (Kochhar and McGarrie, 1992) nuancent en évoquant le nombre d'ordres plus que la quantité totale et la variété. (Rocky Newman and Sridharan, 1995) identifient parmi les facteurs d'adoption des PPC les caractéristiques de la demande comme la prévisibilité et la variabilité.

Le niveau de personnalisation des produits est inclus dans la grille proposée par (Maccarthy and Fernandes, 2000). Pour eux, plus le niveau de personnalisation est faible, plus le système de production est rigide et le PPC simplifié. Ils évoquent ainsi la possibilité d'utiliser un simple tableur pour gérer une ligne continue. Ce niveau de personnalisation est directement lié à la variété des produits fabriqués par une entreprise.

La complexité du produit

La complexité du produit est souvent traduite par la forme de la nomenclature et le nombre de composants nécessaires à la réalisation du produit. (Porter et al., 1999) définissent 5 formes principales symbolisées par des lettres (A,V, T, I ou X).

La taille de l'entreprise

Selon (Maccarthy and Fernandes, 2000), quel que soit le niveau de répétitivité du système industriel, l'augmentation de la taille de l'entreprise conduit à une complexification du PPC.

La liste que nous venons d'établir n'est pas exhaustive mais elle reprend les caractéristiques qui reviennent dans les réflexions liant contexte industriel et choix du PPC. Ces caractéristiques peuvent être considérées indépendamment les unes des autres ou bien intégrées dans des grilles permettant de situer le contexte et de positionner les PPC. Elles constituent une forme d'aide à la décision.

Exemples de grilles existantes

S'il est clairement établi qu'il est indispensable de lier l'environnement, la stratégie et le PPC (Olhager and Selldin, 2007; Porter et al., 1999; Wiendahl et al., 2005), établir un lien entre les caractéristiques et le choix du PPC est complexe. Cependant plusieurs auteurs proposent des approches combinant plusieurs caractéristiques.

Pour (Stevenson et al., 2005), le choix peut être fait en fonction de la configuration de l'atelier et de la stratégie de réponse à la demande. Comme indiqué dans la Figure II-8, Au sein du mode MTO, ils distinguent deux sous-catégories RBC pour (Repeat Business Customiser) et VMC (Versatile Manufacturing companies). Les premières correspondent à la customisation de produits standards alors que les seconds fabriquent des produits uniques. Pour les auteurs, il existe plusieurs PPC adaptés à chaque situation. Cette typologie est une base de réflexion qui doit être approfondie en fonction d'autres éléments tels que la robustesse du PPC, la collaboration du PPC avec un autre, l'applicabilité des PPC émergents...

	MTS		MTO (RBC)	MTO (VMC)
Pure Flow Shop	Kanban CONWIP ERP TOC	General Flow Shop	WLC CONWIP ERP POLCA TOC	Not Applicable
		General Job Shop	WLC ERP TOC	WLC ERP TOC

Figure II-8 Matrice de sélection des PPC alternatifs (Stevenson et al., 2005)

(Maccarthy and Fernandes, 2000) établissent une proposition en 7 catégories en fonction du niveau de répétitivité du process de production. Pour chacun des catégories, ils caractérisent les variables du contexte et de l'organisation industriels. Ils incluent des variables peu exploitées par les autres auteurs comme le temps de réponse, le type de buffer. Pour chaque environnement ils préconisent les PPC possibles.

(Tenhiälä, 2011) propose une approche centrée sur l'organisation physique de l'atelier et non pas sur un PPC en particulier mais sur les processus PPC qui peuvent être mobilisés. La Figure II-9 met en avant le lien entre ces deux éléments. Cette approche est intéressante car elle apporte une aide à la décision sur la pertinence des outils utilisés en fonction de l'organisation physique de l'atelier et de l'interdépendance des tâches.

	Job shop	Batch process	Batch process with bottleneck control	Production line
Process complexity ■ resources → different kinds of routings	 Planning points = 1	 Planning points > 1	 Planning points = 1	 Planning points = 1
Task interdependence	Pooled	Reciprocal	Sequential around the bottleneck	Sequential
Non-systematic capacity planning	Not recommendable for any environment due to high exposure to human error and variance in planners' personal competences			
Rough-cut capacity planning (RCCP)	Fit	Unfit due to insufficient precision		
Capacity requirements planning (CRP)	Unfit because the high variety of outputs makes the maintenance of planning parameters very difficult	Fit	Unfit because calculating loads for all resources is not necessary and more precise methods are possible	
Finite loading with capacity leveling		Unfit because the subject of finite loading is not stationary	Fit	
Finite loading with optimization			Fit	

Fig. 2. Link between planning methods and process types.

Figure II-9 Lien entre les méthodes de planification et les types de process (Tenhiälä, 2011)

(Porter et al., 1999) mettent en rapport plusieurs caractéristiques avec la famille de PPC utilisée et définissent ainsi 5 cas possibles. Ils incluent notamment l'incertitude et la complexité de l'environnement. La Figure I-5 mets en évidence 5 PPC et les caractéristiques de l'environnement productif.

Type de mécanisme	PERT/ techniques CPM	MRP	MRP/JAT	Ordonnancement d'atelier	Ordonnancement de process
Job vs continue	Complexe	Jobbing	Batch	Mass	Continue
MTS vs MTO	DTO/MTO	MTO	MTO/MTS	MTS/ATO	MTS
Incertitude	Forte	→	→	→	Faible
Complexité 4	Faible	→	→	→	Forte
Secteur d'activité		Environnement d'ingénierie	?	?	Alimentaire et boissons
Type de nomenclature	A	A,V	A, V, T, X	A, T, X, I	I
Customer order decoupling point	Nombreux	→	→	→	Peu de composants
	Intervalle long	→	→	→	Intervalles faibles
Nb de composants par produit finis vs temps entre les produits fabriqués	WIP faible	→	→	→	WIP FORT
Relation entre intensité du capital et les besoins en main d'œuvre	Capital faible Main d'œuvre forte	Fort	Faible	Faible	Capital fort MO faible

Figure II-10 Manufacturing classifications: relationships with production control systems (Porter et al., 1999)

Les modèles présentés sont une aide à la décision mais aucun n'est complet et d'autres caractéristiques sont parfois utilisées. In fine, c'est la performance de chaque PPC dans un contexte donné qui justifie sa pertinence.

Singulièrement, (Kochhar and McGarrie, 1992) mettent en avant le rôle des managers et de la formation dans l'implantation et l'utilisation d'un nouveau PPC. Cette dimension plutôt qualitative n'est que très peu exploitée, aucune des comparaisons ou des grilles de choix étudiées n'inclut ce type de critère qualitatif.

Compte tenu des principales caractéristiques identifiées et des préconisations des différents auteurs concernant l'adaptation des PPC au contexte industriel, nous avons réalisé une synthèse présentée dans le [Tableau II-5](#) ci-dessous.

Tableau II-5 Synthèse types d'environnement productif vs PPC utilisables

Typologie Niveau 1	PROCESS PROJET		PROCESS DISCRET			PROCESS CONTINUS		
	Projet	Unitaire	Intermittent		Répétitif	Batch Process	Process	
Organisation atelier	Chantier	Centrée autour du produit assemblé	Job shop	Open shop	Flow shop	Ligne (chaîne) continue	Ligne (chaîne) continue	Process
							Multi-produits BATCH	Mono-produit
Mode de réponse à la demande	ETO	ETO	MTO	MTO-	MTO-ATO-MTS	MTS	MTS	MTS
Volume de production	Unitaire	Unitaire	Petites à moyennes	Petites à moyennes	Moyenne à grandes séries	Grande série	Masse	Masse
Prévisibilité	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte
Personnalisation	Totale	Totale	Totale	Totale	Possible	Possible	Possible	Aucune
Complexité du produit	Forte	Forte	Indéfinie	Indéfinie	Indéfinie	indéfinie	Faible	Faible
Taille entreprise	Indéfinie	Indéfinie	Indéfinie	Indéfinie	Moyenne à grande	Grande	Grande	Grande

Principe	Produit unique non déplaçable	produit déplaçable	Organisation en atelier spécialisé par métier	Cf. job shop, mais tous les trajets ne sont pas identiques	Organisation en ligne non connectée physiquement et toutes les références ne passent pas par les tous les postes, mais ordre identique	Ligne connectée et opérations identiques	Ligne connectée et opérations identiques	Production sans arrêt possible un process identique
Exemple	chantier naval	machines spéciales, prototype	Usinage de précision Assemblage de pièces		Électroménager	assemblage final automobile	produits de grande consommation	Pétrochimie, aciérie
PPC utilisables	PERT/chemin critique	PERT/chemin critique	MRP2, POLCA, CONWIP, DBR,		KANBAN, MRP2, CONWip	MRP2	Kanban, CONWIP, MRP	Tableur

Ce tableau a été effectué sur la base des recherches effectuées pour chaque PPC ainsi qu'à partir des recommandations faites dans les grilles de choix. Ces analyses nous ont permis de situer les principaux PPC par rapport aux environnements industriels décrits selon 10 caractéristiques identifiées.

On constate que pour chaque contexte industriel, il existe souvent plusieurs PPC utilisables. Le choix d'un PPC relève donc effectivement dans un premier temps du contexte industriel. Cependant, d'autres critères doivent être intégrés pour décider parmi les PPC « éligibles » ce qui nécessite de comprendre le fonctionnement précis du PPC et d'en évaluer objectivement sa performance pour déterminer ses conditions de performance et donc sa pertinence dans un contexte donné.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons reprécisé la contribution du système productif à la performance globale et étudié les différentes approches permettant de faire face à l'incertitude. Nous les avons classées en fonction du niveau décisionnel sur lequel elles agissent. Toutes les approches exposées présentent des avantages mais ont également des limitations. Parmi ces approches, **l'adaptation du PPC semble être une approche pertinente** car elle offre une vision systémique et est susceptible de contribuer aux 3 niveaux décisionnels du système productif. L'intérêt est confirmé par l'émergence de 13 nouveaux PPC depuis les années 2000.

Nous avons défini les PPC et leur rôle au sein du système productif. Nous avons ensuite décrit synthétiquement les principaux PPC et leur vision de la performance et proposé une grille de synthèse des caractéristiques permettant de les situer. Plusieurs auteurs ont démontré la nécessité de choisir le PPC selon les caractéristiques du contexte industriel et de l'organisation de l'entreprise. **Le contexte VUCA que nous connaissons actuellement redonne un intérêt à la problématique du choix du PPC qui doit permettre aux entreprises industrielles de faire face à l'incertitude.** Nous avons proposé une synthèse permettant de situer les PPC par rapport au contexte industriel. Elle met en évidence le fait que pour un contexte industriel donné plusieurs PPC sont éligibles. Ce constat souligne la nécessité d'une évaluation plus fine des PPC notamment en intégrant les dimensions qualitative et quantitative pour permettre le choix.

Dès lors, si le contexte industriel est le 1^{er} élément à considérer au moment du choix d'un PPC, il paraît également essentiel de pouvoir comprendre son fonctionnement précis et les fondements de sa performance globale afin de déterminer sa pertinence pour l'entreprise notamment dans le contexte VUCA. **Il est donc nécessaire d'évaluer globalement le PPC ainsi d'aider au choix d'un PPC adapté.** Cependant l'étude de la littérature PPC nous a montré qu'il n'existe, a priori, pas de cadre méthodologique pour une telle évaluation globale d'un PPC.

Nous proposons donc un cadre méthodologique répondant à ce besoin et s'appuyant sur 3 phases : P0-caractérisation, P1-étude qualitative et P3-étude quantitative. Le chapitre suivant permettra de présenter l'approche méthodologique proposée ainsi que la phase de caractérisation qui en est le socle.

Chapitre III

Approche méthodologique

<u>III-1</u>	<u>D'UN RAPPORT D'ANALYSE DES PPC AU CŒUR DE LA MÉTHODOLOGIE</u>	55
	III-1.1 Étude du périmètre fonctionnel	57
	III-1.2 Analyse des principales caractéristiques	60
	III-1.3 Analyse détaillée des éléments constitutifs du PPC	63
	III-1.4 Évaluation de la performance quantitative	65
	III-1.5 Analyse de la performance qualitative du PPC	67
	III-1.6 Traçabilité de l'étude	69
	III-1.7 Synthèse de l'analyse	69
<u>III-2</u>	<u>CADRE MÉTHODOLOGIQUE POUR LA CONSTRUCTION DU RAPPORT D'ANALYSE</u>	71
	III-2.1 Présentation du cadre général	71
	III-2.2 Articulation Phases-éléments du cadre méthodologique	73
	III-2.3 P0-caractérisation et ses interfaces	74
	III-2.4 P1-Etude qualitative	75
	III-2.5 P2-Etude quantitative	76
	III-2.6 Un cadre méthodologique adaptable	77
<u>III-3</u>	<u>DÉTAILS MÉTHODOLOGIQUES DE LA PHASE P0-CARACTÉRISATION</u>	80
	III-3.1 P0-1 Appropriation des concepts	80
	III-3.2 P0-2 État de l'art	80
<u>CONCLUSION</u>		83

RÉSUMÉ

La revue de littérature a mis en évidence la pertinence de l'adaptation des PPC pour faire face à un environnement VUCA. Elle a également démontré qu'il n'y a, a priori, pas de cadre méthodologique permettant la compréhension et l'évaluation d'un PPC. Par conséquent, nous en proposons un qui a pour but d'évaluer globalement un PPC en combinant 3 Phases. Ce cadre méthodologique conduit à la construction d'un rapport d'analyse constitué de 7 livrables. Ce cadre doit permettre de comprendre, positionner le PPC et évaluer sa performance.

Dans ce chapitre après avoir présenté l'intérêt et le positionnement de l'approche, nous développerons (1) la conception du rapport d'analyse permettant l'évaluation de la performance globale d'un PPC, et (2) les détails du cadre méthodologique proposé. La 3^{ème} partie de ce chapitre sera dédiée à la présentation détaillée la 1^{ère} phase du cadre, qui est un préliminaire.

L'étude bibliographique a démontré l'intérêt de nouvelles approches PPC afin de répondre aux enjeux de l'environnement VUCA. Sur 20 ans, 13 nouveaux systèmes ont été recensés (Bagni et al., 2021). Tous sont présentés comme des solutions alternatives aux PPC traditionnels avec des performances satisfaisantes.

Néanmoins, le contexte et les conditions de réalisation de ces performances sont rarement étudiés de façon globale. Les mécanismes sous-jacents sont souvent peu explicités, ce qui ne permet ni de comprendre les ressorts de la performance des PPC proposés ni d'en saisir les enjeux. La bibliographie ayant par ailleurs mis en évidence la nécessité d'adapter les PPC en fonction du contexte industriel (Chan and Burns, 2002; Olhager and Selldin, 2007; Van Dierdonck and Miller, 1980), il paraît capital de définir le ou les contextes pour lesquels un PPC semble plus adapté et sous quelles conditions. Or nous n'avons pas retrouvé d'outil permettant d'effectuer ce travail. De même, aucune des études répertoriées ne fait état des retours d'expérience des utilisateurs et des experts qui sont pourtant à même de préciser les conditions de la performance des PPC en soulevant les avantages et les inconvénients et ainsi d'offrir une optique qualitative de la performance. La vision de la performance des PPC est donc souvent parcellaire et majoritairement cantonnée aux seuls aspects quantitatifs.

L'étude bibliographique n'a pas retrouvé d'outil d'évaluation de la performance globale des PPC qui pourrait être utilisé pour étudier les nouvelles approches. Notre objectif est donc d'apporter une réponse à ce besoin en proposant un cadre méthodologique complet. Ce dernier pourra répondre au besoin d'évaluer les PPC émergents, mais pourra également servir dans le cadre de l'évaluation des PPC traditionnels en apportant la composante qualitative lorsqu'elle n'est pas ou peu évaluée dans la littérature existante.

Le caractère, a priori, exploratoire de la démarche d'évaluation globale d'un PPC conduit à des objectifs de recherche d'Exploration et de Description au sens de Robson and McCartan (2016).

Tableau III-1 Les types d'études selon Robson et McCartan (2016)

Objectifs	Questions types	Type d'étude
Explorer	Découvrir des phénomènes Chercher de nouvelles perspectives D'évaluer les phénomènes sous un jour nouveau	Souvent, mais pas nécessairement, qualitative
Décrire	Dresser un profil précis d'un processus, d'un événement, d'une situation Fournir des connaissances approfondies sur un sujet	Qualitative et/ou quantitative
Expliquer	Tester une théorie Établir des relations de cause à effet	Qualitative et/ou quantitative

Nos objectifs sont avant tout d'explorer et de décrire le fonctionnement et la performance d'un PPC. Comme indiqué dans le Tableau III-1, ces objectifs peuvent faire appel à des techniques quantitatives et qualitatives. Le cadre méthodologique proposé combine les 2 types afin d'apporter une vision globale et la plus objective possible. La combinaison d'approches peut, en effet, permettre de limiter les biais inhérents à chacune, générer un enrichissement mutuel et ainsi offrir une diversité et une objectivation des résultats.

Nous proposons d'établir un rapport d'analyse de PPC permettant de le comprendre, de le positionner et d'évaluer objectivement sa performance tant quantitative que qualitative. Le rapport proposé est constitué de 7 livrables. Afin de les alimenter rigoureusement, le cadre méthodologique comprend 3 phases : une pré-étude ou phase de caractérisation (P0) qui constitue le socle et 2 piliers : l'un Qualitatif (P1) et l'autre Quantitatif (P2). La philosophie générale du cadre méthodologique peut être schématisée à la manière du Temple Lean (cf. Figure III-1) afin de souligner la complémentarité des Études Quantitative et Qualitative ainsi que la nécessité d'une pré-étude (caractérisation) pour la constitution du rapport d'analyse.

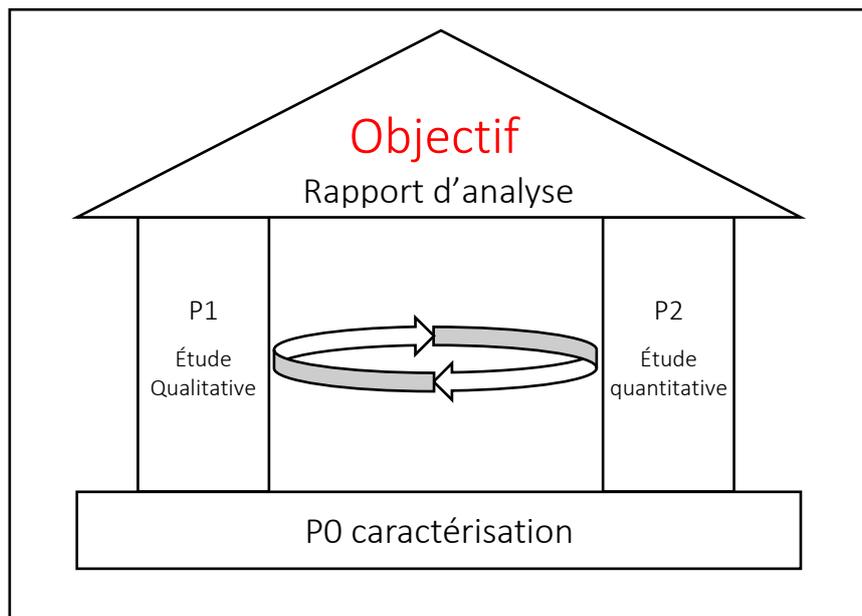


Figure III-1 Représentation de la philosophie général du cadre méthodologique proposé

Le présent chapitre présente tout d'abord la conception du rapport d'analyse et de ses 7 livrables, puis le cadre méthodologique mis en place pour le constituer et enfin le détail de la phase PO caractérisation. Cette dernière constitue la base du cadre, c'est pourquoi elle sera présentée dans ce chapitre tandis que les 2 autres seront respectivement développées dans les chapitre 4 et 5.

III-1 d'un rapport d'analyse des PPC au cœur de la méthodologie

L'objectif de notre étude est de fournir une analyse globale de la performance d'un PPC à travers l'élaboration d'un rapport d'analyse qui permette de le comprendre, le positionner et l'évaluer le plus objectivement possible notamment dans un environnement VUCA.

Pour atteindre cette vision globale, l'analyse proposée aborde 5 thématiques différentes propres à l'étude des PPC, chacune donnant lieu à un livrable

- **Analyse du périmètre fonctionnel** : il s'agit de répertorier les processus intégrés dans le PPC étudié, par rapport à une définition générique du périmètre fonctionnel des PPC.
- **Analyse des caractéristiques générales** : ces caractéristiques sont divisées en 2 catégories : celles qui permettent de décrire le PPC et sa philosophie générale et celles qui caractérisent l'environnement industriel dans lequel le PPC semble adapté. L'objectif est de pouvoir positionner le PPC.
- **Étude des éléments constitutifs** : l'enjeu est ici de comprendre le fonctionnement nominal du PPC, c'est-à-dire d'être capable d'explicitier le rôle de chaque élément et de soulever ses impacts potentiels sur la performance.
- **Analyse de la performance quantitative** : l'essentiel de cette thématique est d'étudier l'impact du PPC sur les indicateurs clés de la performance du système industriel.
- **Analyse de la performance qualitative** : L'objectif est de traduire la vision des utilisateurs et experts en termes d'avantages et d'inconvénients. Ce type d'information pourrait être précieux dans le cadre de l'aide à la décision pour le choix d'un PPC

Les 3 premières thématiques contribuent à la compréhension et au positionnement du PPC donc également à la compréhension du cadre et des conditions de sa performance globale. Les 2 dernières

thématiques abordent l’analyse de la performance, la première d’un point de vue quantitatif et la seconde d’un point de vue qualitatif.

L’étude de ces 5 thématiques conduit à la création de 5 livrables (D1 à D5) associés à chacune d’entre elles. Ils sont incrémentés à chaque itération, ce qui permet la traçabilité des résultats et leur capitalisation. D0 est un préalable qui répertorie les itérations et les codifie pour permettre le repérage au sein des livrables. D6 est une synthèse actualisée de l’évaluation du PPC à un instant donné. Il pourra donc exister plusieurs versions en fonction de l’état de la connaissance à un instant donné.

Le rapport d’analyse est donc composé de 7 livrables. La [Figure III-2](#) suivante explicite les liens entre les thématiques étudiées et les livrables associés. Il retrace également leur contribution à l’établissement des livrables D0 et D6.

Objectifs	Compréhension/Positionnement du PPC			Analyse de la performance	
Thématique	Analyse du périmètre fonctionnel	Analyse des caractéristiques générales	Étude des éléments constitutifs	Analyse de la performance quantitative	Analyse de la performance qualitative
Délivrable	D1 Périmètre fonctionnel	D2 Grille d’Analyse des Caractéristiques Générales	D3 Synthèse des Éléments Constitutifs	D4 Grille d’Analyse des indicateurs	D5 Synthèse Bénéfices/Risques
	 D0 Structuration de l’étude D6 Conclusion et Recommandations				

Figure III-2 Structure globale du rapport d’analyse

Les livrables « thématiques » D1 à D5 auront tous une structure identique schématisée dans la [Figure III-3](#). Cette structure est articulée autour de 3 macro « blocs ».

- **Synthèse** : elle présente les éléments clés à retenir sur la thématique étudiée par le livrable. Le contenu présenté tient compte de l’ensemble des itérations réalisées et fait état des connaissances à un instant donné. La synthèse est présentée sous forme d’un tableau dont la forme exacte est spécifique à chaque livrable et est présentée dans les paragraphes suivants. Chaque élément exposé dans la synthèse est identifié par un Code permettant d’y faire référence dans la suite du livrable.
- **Itérations** : Le macro Bloc décrit l’ensemble des itérations. Chaque itération est codifiée. Phase Px-i: avec

- o La Phase Px avec x = 0 à 2 (respectivement caractérisation, étude qualitative et étude quantitative)
- o i = numéro d’itération

Chaque itération « Phase Px-i » comprend 3 sous parties

- o **Description-Analyse** organisée par éléments, elle présente les analyses pour chaque élément impacté par la Phase Px-i
- o **Réflexions** permettant de soulever les points saillants, les éventuelles questions en suspens
- o **Interfaces** qui permet le suivi des questionnements issus d’une phase et nécessitant une validation soit par une autre phase soit par une nouvelle itération au sein de la phase. Les questions sont numérotées avec un code Interface Px-Py/Dz avec :
 - Px la Phase de laquelle est issue la question,
 - Py la Phase suivante qui devra la traiter,
 - Dz le livrable concerné (de 1 à 5)

Délivrable D : Titre
Synthèse
Itérations
Phase Px-1 <u>Description – Analyse</u> 1. Élément 1 2. Élément 2 i. Élément i <u>Réflexions</u> <u>Interfaces</u> Px-Py/Dz
Phase Px-i <u>Description – Analyse</u> 3. Élément 1 4. Élément 2 ii. Élément i <u>Réflexions</u> <u>Interfaces</u> Px-Py/Dz

Figure III-3 Exemple de la structure générale des livrables D1 à D5

Dans la suite, chacune des thématiques fait l’objet d’un descriptif de ses objectifs, de la méthodologie de construction du livrable et d’une description de ce dernier.

III-1.1 Étude du périmètre fonctionnel

Objectif

On souhaite identifier l’ensemble des processus mobilisés dans le cadre du PPC étudié. Si l’on définit un PPC comme un ensemble de processus hiérarchisés visant à planifier et à contrôler la production afin de répondre à la demande client, on peut identifier ceux concernés par le PPC étudié. L’identification du périmètre d’un PPC le positionne par rapport aux autres et permet une meilleure compréhension des leviers utilisés pour améliorer la performance.

Méthodologie de construction

La revue de littérature du chapitre 2 a montré que les PPC n’étaient pas toujours définis de la même manière par les auteurs. Certains auteurs en donnent une vision très extensive allant jusqu’à intégrer des réflexions stratégiques et tactiques tels les choix de conception de produits ou de process (Anil Kumar and Suresh, 2008; Jeon and Kim, 2016; Kiran, 2019) quand d’autres se focalisent sur les processus récurrents de planification (Berry and Hill, 1992; Jacobs et al., 2011; Vollmann et al., 1997).

L'étude des différents PPC traditionnels (MRP2, Kanban, POLCA, CONWIP) montre que ces derniers sont inscrits dans cette 2^{de} vision considérant uniquement les processus routiniers de la planification et de contrôle. En effet, aucun d'entre eux ne considère les choix réalisés en amont du processus de planification et de contrôle tels la conception des systèmes productifs (organisation d'atelier, implantation de site), la conception des produits ou encore les choix de process... Ces derniers ont évidemment un impact sur la planification et le contrôle, mais ne présentent pas de caractère récurrent : on ne réimplante pas une usine à chaque mise en œuvre du processus de planification.

En l'absence de consensus sur la définition du périmètre des PPC, nous proposons en premier lieu de scinder le périmètre global du PPC en 2 grands ensembles de processus : les processus récurrents et les processus ponctuels. Les premiers sont ceux qui entrent en jeu à chaque fois que le processus de planification est lancé. Les seconds sont ceux qui n'interviennent que lorsque des changements majeurs se produisent (nouveaux produits, process, changement de stratégie...).

Nous proposons ensuite de définir le périmètre fonctionnel du PPC *comme l'ensemble des processus récurrents exécutés par le système de Pilotage de la Production permettant de planifier la production et les approvisionnements et d'en contrôler la bonne exécution*. Nous nous limitons donc aux processus récurrents et excluons ainsi les processus ponctuels (conception de produit, de process, implantation de site ou d'atelier, investissement matériel) ainsi que les processus qui relèvent d'autres sous-systèmes de l'entreprise comme la prévision des ventes qui relève du système commercial.

Enfin, notre vision intègre la notion de **hiérarchisation temporelle** des processus comme (Berry and Hill, 1992; Jacobs et al., 2011; Vollmann et al., 1997). Nous avons choisi de les regrouper par niveaux décisionnels (stratégique, tactique ou opérationnel) en fonction de l'horizon temporel concerné par les décisions prises à l'issue de chaque processus

Suite à l'étude bibliographique, nous avons identifié les 9 processus récurrents communs aux approches étudiées. Nous choisissons volontairement d'utiliser un vocabulaire généraliste pour étendre l'approche et ne pas nous focaliser sur un PPC en particulier.

Nous présentons ici l'ensemble des processus récurrents identifiés dans le périmètre fonctionnel du PPC et précisons leur rôle afin d'être capables d'évaluer si le processus est intégré ou non dans le PPC étudié.

Au niveau stratégique, deux processus sont retenus :

- **Détermination globale des besoins** : il s'agit pour l'entreprise de donner une vision macroscopique des besoins en fabrication de produits finis. Ce processus s'appuie généralement sur les prévisions des ventes et doit permettre de déterminer une charge globale de travail pour l'atelier sur un horizon de long terme.
- **Détermination des ressources globales** : ce processus détermine les besoins en ressources globales de production en fonction de la charge globale et de l'appareil industriel existant. Il permet de déterminer si la capacité existante est suffisante par rapport à la charge prévisionnelle ou s'il faut réaliser des investissements.

Le niveau tactique comprend lui aussi 2 processus :

- **La détermination des ordres de fabrication et d'approvisionnement par référence**. Il s'agit du moteur des PPC, ce processus permet de déterminer les quantités par référence à produire (produits finis et composants) et à approvisionner. Il détermine donc les charges détaillées ainsi que le plan d'approvisionnement. Notons que chaque PPC possède sa propre méthodologie. Ce processus est parfois découpé en 2 phases comme pour MRP2 : le Plan Directeur de Production pour les produits finis puis le Calcul de Besoins Nets pour les semi-finis et les approvisionnements. Il s'agit ici d'offrir une vision générale et non pas d'entrer dans le détail du processus.
- **La détermination détaillée de la capacité** : le processus débute par l'analyse charge/capacité pour chaque type de ressources. L'objectif est d'adapter la capacité et ainsi de s'assurer de la bonne réalisation du plan de production. Les décisions prises à ce niveau correspondent à la répartition de la charge dans les temps et/ou entre les ressources, à l'adaptation des horaires de travail, ou encore du nombre de personnes.

Enfin, le **niveau opérationnel** comprend plusieurs processus :

- **Le lancement des ordres** : c'est la mise en fabrication dans l'atelier des ordres. Pour certains PPC les ordres ont été déterminés au niveau tactique et sont ensuite lancés comme dans le cas de MRP2. Dans d'autres cas, c'est directement la consommation dans l'atelier qui génère directement les ordres et leur lancement comme dans le cas de Kanban.
- **L'ordonnement** : il s'agit de déterminer conjointement les dates d'exécution d'un ensemble d'opérations et des ressources mobilisées dans cette exécution.
- **Le séquençement** : il définit l'ordre de passage de chaque opération pour une ressource particulière.
- **Le suivi des ordres** : c'est la phase de surveillance de l'avancement de l'ordre dans l'atelier. Le planning est-il respecté ? L'Ordre de Fabrication (OF) sera-t-il terminé dans les délais ? Il s'agit également d'établir les statistiques concernant le respect des délais et d'assurer les actions correctives en cas de dérives.
- **Le suivi des ressources productives** : il s'agit de contrôler les ressources productives et de s'assurer que la capacité réelle est conforme à la capacité prévue pour la réalisation du planning productif. Là encore, les dérives doivent conduire à des actions correctives.

Notre approche peut être résumée à travers la [Figure III-4](#) ci-dessous :

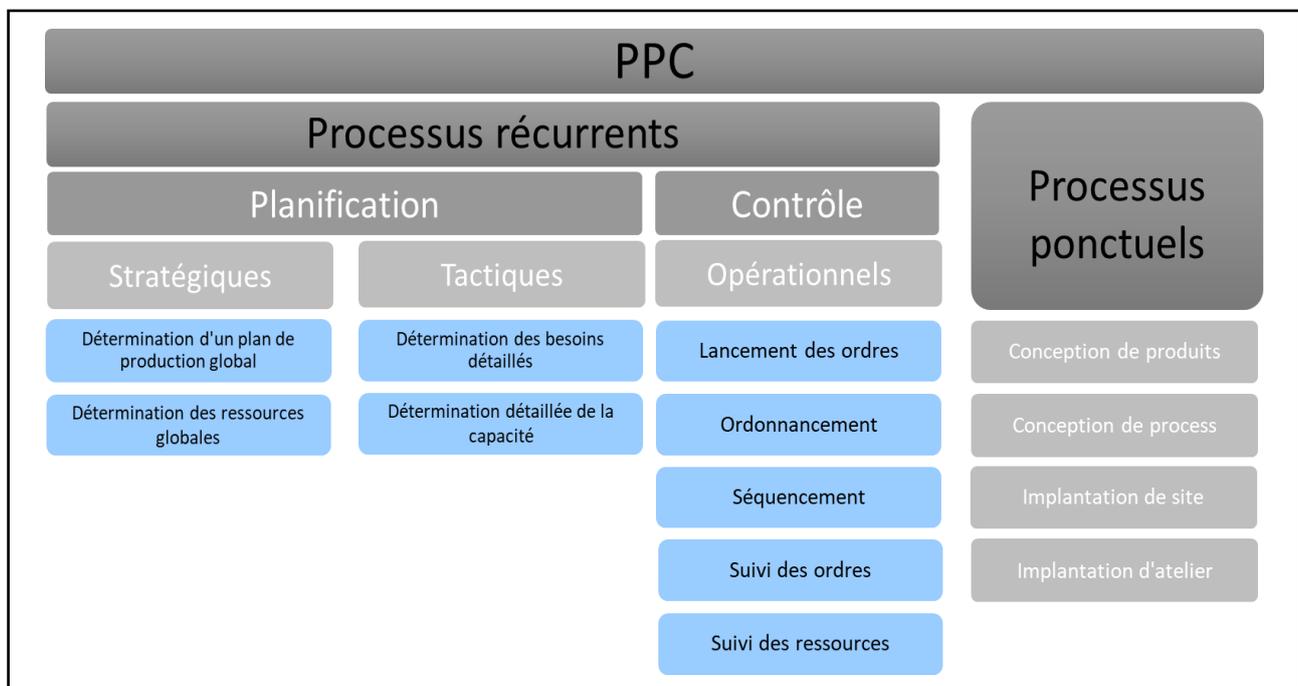


Figure III-4 Proposition d'une vision du périmètre global du PPC

Ce que nous définissons, dans ce travail, comme **le périmètre fonctionnel des PPC se limite aux processus récurrents comprenant la partie Planification et la partie Contrôle** (en couleur sur le schéma). Chaque système PPC existant comprend un éventail de solutions et outils qui impactent ou non ces différents processus récurrents. Dans le cadre de l'analyse de la performance d'un PPC, la définition du périmètre fonctionnel nous paraît essentielle. Elle nous renseigne sur l'ampleur du PPC et les processus sur lesquels il s'appuie. Un PPC complet, comprendrait l'ensemble des processus.

Nous proposons donc de matérialiser le périmètre fonctionnel du PPC étudié par un tableau récapitulatif. Ce tableau constitue le 1^{er} livrable (D1) de notre cadre méthodologique. Nous le détaillons dans le paragraphe suivant.

Délivrable D1 : Périmètre fonctionnel

Nous proposons que le rapport d'analyse comprenne un 1^{er} livrable (D1) matérialisé par un tableau récapitulatif ainsi qu'une brève analyse, qui délimitent le périmètre fonctionnel du PPC étudié.

Nous proposons une évaluation binaire : il s'agit ici seulement de déterminer si le PPC étudié impacte ou non le processus et non d'entrer dans le détail des mécanismes proposés. Dans le tableau récapitulatif, la case correspondante est remplie si le PPC propose clairement une approche et/ou un outil dédié(s) pour le processus considéré.

Le [Tableau III-2](#) donne l'exemple du périmètre fonctionnel de MRP2 standard i.e. sans prise en compte des stocks de sécurité ou des tailles de lot. Dans l'exemple appliqué à MRP2 classique, on constate que le périmètre est relativement étendu, car il comporte 6 processus sur 9. Ainsi on peut considérer que MRP2 est plus centré sur la partie Planning que sur la partie Contrôle du PPC. En effet, MRP2 classique ne comporte pas de recommandations sur l'ordonnancement, le séquençement et le suivi des ordres qui font l'objet de développements indépendants.

Tableau III-2 D1 Exemple de périmètre fonctionnel du PPC réalisé pour MRP2

Niveau de décision	Processus	Concerné Remplissage X = processus inclus Vide = processus non concerné
D1- Stratégique	(1) Détermination d'un plan de production global = charge globale	X
	(2) Détermination des ressources globales = capacité globale	X
D1- Tactique	(3) Détermination des besoins détaillés par référence	X
	(4) Détermination détaillée de la capacité	X
D1-Opérationnel	(5) Lancement des ordres de fabrication et d'approvisionnement	X
	(6) Ordonnancement,	
	(7) Séquençement	
	(8) Suivi des ordres	
	(9) Suivi des ressources productives	X

L'objectif du périmètre fonctionnel est de situer le rayon d'action du PPC, mais pas d'entrer dans les détails des outils et méthodes utilisés. Ces détails seront analysés dans les paragraphes suivants dans le cadre des thématiques « Analyse des caractéristiques générales » (D2) et « Étude des éléments constitutifs » (D3).

III-1.2 Analyse des principales caractéristiques

Objectif

Pour comprendre un PPC, il faut être capable de déterminer ses principales caractéristiques parmi celles attendues d'un PPC ainsi que les contextes industriels auxquels il s'applique. Cette démarche permet de le situer parmi les autres PPC et donc d'appréhender sa pertinence au regard de son positionnement. Nous proposons de regrouper ces caractéristiques dans un tableau de synthèse composé de 2 grandes parties : les caractéristiques générales des PPC et les contextes industriels favorables.

Méthodologie de construction

Afin de constituer le tableau de synthèse, nous nous sommes basés sur la bibliographie dédiée aux PPC. Elle a fait ressortir différentes caractéristiques permettant, d'une part, de décrire un PPC et, d'autre part, de définir les éléments du contexte industriel à prendre en compte dans le choix du PPC. Les 25 caractéristiques, que nous avons retenues, ont été classées en 8 catégories dont les 3 premières servent à la description générale du PPC et les 5 suivantes à l'étude des contextes industriels.

Pour chaque catégorie, plusieurs caractéristiques ont été retenues et pour chacune, les valeurs courantes ont été répertoriées dans la littérature. Nous proposons donc des listes de valeurs pour permettre l'évaluation d'un PPC, mais ces listes restent ouvertes. En effet, dans le cas d'un nouveau PPC, il est probable de trouver des approches originales qui viendront enrichir nos propositions.

Concernant la partie description générale du PPC, 3 catégories sont créées, chacune comprenant plusieurs caractéristiques. Nous précisons ici le détail de chacune d'entre elles:

- Philosophie générale du PPC : il s'agit de déterminer la vision générale portée par le PPC concernant 2 points majeurs :
 1. L'objectif de performance : quels sont les aspects de la performance industrielle qui sont visés par le PPC, l'ambition même du PPC ?
 2. Intégration de l'incertitude : s'agissant d'évaluer un PPC notamment dans le contexte VUCA, le positionnement face à l'incertitude est un élément essentiel de compréhension. Le PPC propose-t-il des solutions pour la réduire, est-elle intégrée dans la réflexion ou faut-il la limiter pour que le système fonctionne ?
- Génération des ordres : c'est généralement le cœur de la méthode PPC. Il s'agit de définir plusieurs éléments
 3. Le rôle des prévisions : paramétrage et/ou rôle opérationnel dans le déclenchement des ordres.
 4. La capacité : finie ou infinie.
 5. Le niveau de prise des décisions : centralisé, décentralisé ou mixte
 6. Le modèle de gestion de stock : continu/point de commande, quantité fixe/variable.
 7. Le contrôle du flux : 2 méthodes existent : Rate Based, dans laquelle le planning est établi en fonction des cadences de production, ou Time Phased, le planning est défini selon les délais de production et la demande client. Il est également possible que le PPC combine les 2 approches dans un système mixte.
- Pilotage de l'atelier : que propose le PPC en termes de gestion d'atelier,
 8. Mode de contrôle de l'atelier : Poussé/tiré ou Mixte. Il s'agit de définir comment les ordres sont libérés dans l'atelier. Dans le mode poussé, les ordres sont poussés dans l'atelier en fonction des dates établies dans le planning. En mode tiré, les ordres ne peuvent être lancés que si la production est autorisée, les mécanismes d'autorisation étant variables.
 9. Système à cartes : le pilotage de l'atelier s'effectue-t-il grâce à un système de cartes type Kanban ou similaires.
 10. Système de contrôle des ordres et des ressources : quels sont les indicateurs qui sont surveillés et comment pour assurer la réalisation du planning.

Concernant l'étude des contextes industriels, plusieurs éléments doivent être définis :

- *Les caractéristiques générales* : Le PPC s'adresse-t-il à une catégorie d'entreprises en particulier définie selon 3 éléments :
 11. La taille de l'entreprise : nous sommes basés sur les définitions de l'Union Européenne: Très Petite Entreprise (TPE moins de 10 salariés), Petite et Moyenne Entreprise (PME : 10 à 249 salariés), Entreprise de Taille Intermédiaire (ETI : de 250 à 4999 salariés) et Grande Entreprise (GE 5 000 et plus)
 12. Le secteur d'activité : il s'agit du secteur d'activité économique tel que défini par l'INSEE
- Les process : À quel type de process s'adresse le PPC ? Il s'agit de considérer les principales caractéristiques du process qui influencent le choix du PPC. Nous en avons retenu 4 à savoir :
 13. La stratégie de réponse à la demande: il faut définir comment l'entreprise répond au client. Comme identifié dans l'état de l'art au paragraphe II-3, il existe 2 extrêmes le Make to Stock (MTS) pour lequel l'entreprise anticipe la demande et définit son plan de production en fonction des prévisions des ventes, et le Make to Order (MTO) dans lequel l'entreprise ne déclenche la production qu'à réception des commandes fermes des clients pour des produits qu'elle a déjà développés. Entre ces extrêmes, on trouve le mode Assemble to Order (ATO), pour lequel l'entreprise anticipe la production de composants et déclenche

les phases de finition à réception de la commande, ce qui implique l'existence de point(s) de découplage. Enfin, le mode Engineering To Order (ETO) correspond au déclenchement des phases de R&D à réception de la commande de produits spécifiques.

14. Le mode de production : on se situera au niveau très macroscopique de classifications des modes de production avec 3 possibilités : mode projet, flux discret ou continu.
 15. Organisation d'atelier : il s'agit de déterminer si le PPC est adapté aux différentes configurations : jobShop, OpenShop, FlowShop (ligne déconnectée), Ligne, sur site,
 16. Existence de goulet : le PPC prend-il en compte l'existence de goulet ou non dans son processus de planification ?
- La complexité des produits : il s'agit de savoir si le PPC s'adresse à des produits plus ou moins complexes. Le niveau de complexité pourra être évalué selon les caractéristiques de la nomenclature et de la complexité de l'offre. On retiendra :
 17. Hauteur : en fonction du nombre de niveaux (Faible à Fort),
 18. Largeur selon le nombre de branches,
 19. Densité selon le nombre de composants de la nomenclature par rapport au maximum possible compte tenu de la hauteur et de la largeur
 20. Complexité de l'offre : selon nombre de produits finis vendus par l'entreprise.
 - La demande :
 21. Profil de la demande : le PPC peut-il répondre à une demande récurrente, en augmentation, saisonnière ou sporadique.
 22. Variabilité de la demande : le PPC est-il performant face à une demande variable?
 23. Volume de la production : est-il faible, moyen ou fort?
 24. Visibilité de la demande : l'entreprise connaît-elle la demande réelle longtemps à l'avance ? L'évaluation se fait en général en comparant le délai total d'obtention (Lead Time) au délai de connaissance de la demande réelle.
 - 25. Limitations : il s'agit d'indiquer les éventuels contextes industriels qui seraient peu pertinents pour le PPC étudié. En d'autres termes, il s'agit de définir les caractéristiques qui seraient incompatibles ou déconseillées pour l'utilisation du PPC.

L'ensemble de ces caractéristiques est repris dans le livrable D2 afin d'offrir une vision synthétique du PPC étudié.

Délivrable D2 Grille d'analyse des caractéristiques

Nous avons choisi de présenter les caractéristiques du PPC sous la forme d'un tableau récapitulatif divisé en 2 grandes divisions : Compréhension et Contexte Industriel qui comprennent respectivement 3 et 5 catégories. Les valeurs proposées sont indiquées dans la dernière colonne, la liste de propositions est donnée à titre indicatif, car un nouveau PPC pourrait conduire à de nouvelles options. Le [Tableau III-3](#) est la proposition faite pour la présentation du livrable :

Tableau III-3 D2 Grille d'analyse des caractéristiques

	Catégories	Caractéristiques	Valeurs
D2 Description	Caractéristiques générales /philosophie	(1) Objectif	Ex : Respect des dates, Maîtrise du stock, Maximisation des ventes, Maîtrise de la capacité
		(2) Intégration de l'incertitude	Ex : À limiter Intégrée dans le PPC via une réserve capacitaire...
	Génération des ordres	(3) Rôle des prévisions	Ex : Décision de lancement, Paramétrage
		(4) Capacité	Finie ou Infinie
		(5) Niveau de prise de décisions	Centralisé/Décentralisé/Mixte
		(6) Contrôle du flux dans le planning	Time phased / Rate based ou Mixte
	Atelier	(7) Modèle de gestion de stock	Périodique/Continu quantité fixe/variable
		(8) Contrôle d'atelier	Push/Pull ou Mixte
		(9) Système à cartes	Oui/Non
		(10) Système de contrôle	Quels indicateurs sont surveillés pour assurer la performance de l'exécution
D2-Contexte industriel	Profil des entreprises	(11) Taille de l'entreprise	TPE, PME, ETI ou GE
		(12) Secteur d'activité	Cf. descriptif I
	Process	(13) Mode de réponse à la demande	MTO, MTS, ATO ou ETO
		(14) Mode de production	Projet, Discret, Continu
		(15) Organisation d'atelier	Sur site, centré autour du produit, jobshop, Open Shop, Flowshop, Ligne
		(16) Existence de goulet	Oui, Non
	Complexité produits	(17) Hauteur (Nombre de niveaux de la nomenclature)	Faible ► Forte
		(18) Largeur (Nombre de branches de la nomenclature)	Faible ► Forte
		(19) Densité (nombre de composants)	Faible ► Forte
		(20) Nombre de produits	1 seul ► Multi produit
	Demande	(21) Profil de la demande	Stable, Saisonnière, Ramp-up, Sporadique
		(22) Variabilité de la demande	Faible ► Forte
		(23) Horizon de Visibilité	Faible ► Forte
		(24) Volume de la demande	Faible ► Forte
	Limitations	(25) Limitations	À définir

Ce 2^{ème} livrable donne une vision générale du PPC, mais ne permet pas de définir son fonctionnement précis. Dès lors, nous proposons un 3^{ème} livrable remplissant cette fonction.

III-1.3 Analyse détaillée des éléments constitutifs du PPC

Objectif

Dans le cadre de l'évaluation de la performance, il est nécessaire de décrire les différents éléments constitutifs du PPC pour en comprendre les mécanismes sous-jacents. Le rapport d'analyse doit donc mettre en évidence les éléments clés du fonctionnement général du PPC et indirectement apporter un éclairage sur

les paramètres influençant la performance. Si la Grille d'Analyse des Caractéristiques donne une vision globale, il s'agit ici d'approfondir la partie Description et surtout la « **Génération des Ordres** » qui est souvent au cœur des processus récurrents des PPC.

Le but est d'offrir une vision synthétique permettant de comprendre le rôle des éléments et leurs interactions éventuelles.

Méthodologie de construction

Pour parvenir à une vision synthétique, nous avons choisi de présenter un tableau récapitulatif des éléments constitutifs du PPC et d'en réaliser une analyse.

L'étude des PPC nous a permis de mettre en évidence que tous intègrent dans leur méthode 2 types d'éléments : ceux qui permettent le **paramétrage** et ceux qui permettent le **pilotage** du système, autrement dit la prise de décision permettant de lancer les ordres. Cependant, certains PPC utilisent certains éléments aux 2 niveaux. Ainsi le stock de sécurité de MRP2 est à la fois un élément de paramétrage à fixer et l'un des éléments intégrés dans le calcul de besoins. Cette première catégorisation repose donc sur l'**Utilisation** qui est faite de l'élément.

Les éléments constitutifs peuvent également faire l'objet d'une seconde classification basée sur leur **Nature**. Nous distinguons ainsi les éléments :

- **S'imposant à l'entreprise** comme la nomenclature des produits ou la demande moyenne et sa variabilité. Ils sont non maîtrisables à l'échelle de temps de la planification (court ou moyen terme), on les définira comme les **Éléments Imposés**,
- **Ceux qui résultent de choix** ou de calculs comme le stock de sécurité pour MRP2. Ils sont donc **Déterminés** par l'entreprise. Ces choix sont souvent relatifs à des « critères » qu'il faudra mettre en évidence. Certains de ces éléments sont obligatoires dans le PPC tandis que d'autres sont facultatifs.

Délivrable D3 Synthèse des éléments constitutifs

Il s'agit de faire ressortir les éléments utilisés pour le paramétrage du PPC et son fonctionnement. Le tableau proposé croise les 2 dimensions retenues, à savoir : Utilisation (Paramétrage/Décision) et Nature (Imposé/Déterminé).

Les éléments intégrés dans le tableau décrivent des éléments quantitatifs utilisés dans les calculs du PPC. Les unités utilisées étant propres à chaque entreprise, il ne paraît pas pertinent d'en faire état dans le tableau. Concernant les Éléments Choisis par l'entreprise, il est nécessaire de distinguer ceux qui sont obligatoires dans la méthode de ceux qui sont optionnels.

Le tableau sera accompagné d'un descriptif permettant de comprendre les interactions et surtout d'identifier les points clés. [Le Tableau III-4](#) est un exemple du livrable D3 réalisé pour MRP2. Le descriptif qui est fait doit permettre de comprendre la nature des éléments et les liens qui existent entre eux en distinguant la phase Paramétrage et la phase Pilotage.

Le Délivrable D3 Synthèse des éléments constitutifs doit permettre de comprendre le rôle de chaque composant dans le fonctionnement du PPC. Il apporte également un éclairage sur les enjeux qui leur sont liés en termes de performance.

Tableau III-4 Exemple D3 Synthèse des « Éléments constitutifs » pour MRP2

Nature Utilisation	Imposé	Déterminé	
		Paramètre (obligatoire ou optionnel)	« critère de choix »
Paramétrage	(1) Demande moyenne (2) Nomenclature	(3) Délai de production ou d'approvisionnement (=Lead Time) (4) Stock de sécurité Délai de sécurité Taille de lot	Variabilité demande Variabilité des délais Temps et coût de réglage ou contrainte technique
Pilotage	(5) Demande Réelle Période P (6) Stock P-1 (7) Ordre en Retard P (8) Approvisionnement prévu pour P	(9) Demande prévisionnelle P (10) Stock de sécurité (11) Taille de lot	

Les 3 premières thématiques et leurs livrables D1 à D3 participent à la compréhension et au positionnement du PPC. Les deux thématiques suivantes apportent des éléments concernant la performance à proprement parler.

III-1.4 Évaluation de la performance quantitative

Objectifs

Notre cadre méthodologique ambitionne d'offrir une vision globale de la performance d'un PPC. L'une des composantes est donc la vision quantitative de la performance qui passe par l'étude d'indicateurs représentatifs de l'impact des PPC sur la performance globale. Cette étude poursuit 3 objectifs. Tout d'abord, elle doit permettre d'identifier les axes de la performance quantitative impactés. Elle doit ensuite objectiver les performances annoncées et enfin identifier les facteurs qui ont une influence sur la performance industrielle dans le cadre du PPC étudié notamment en termes de paramétrage et de contexte industriel.

Afin d'évaluer cette performance quantitative, nous proposons de nous focaliser sur un nombre restreint d'indicateurs représentatifs de la performance globale. Le livrable D4 offrira une vision synthétique et comparative de ces indicateurs acquise au fil des phases.

Méthodologie de construction

La 1ère étape a consisté à définir les axes de la performance grâce à l'étude de la littérature et la confrontation aux pratiques industrielles. Nous avons recensé un grand nombre de modèles d'évaluation de la performance industrielle (cf. II-1 Évaluation de la performance), cependant leur niveau de complexité ne nous permet pas de les mettre en œuvre dans le cadre de notre étude.

Nous avons choisi de nous focaliser sur 3 axes de performance représentatifs des attentes des entreprises à l'égard de leur système industriel à savoir :

- La performance client,
- La performance industrielle,
- La performance financière.

L'étude des systèmes de mesure de la performance réalisée au Chapitre II nous a montré qu'il faut un nombre restreint d'indicateurs par axe de la performance. Dès lors, pour chaque axe, nous avons sélectionné 2 indicateurs usuels :

- **La performance client**, c'est l'objectif central du système productif. Nous nous concentrons sur les aspects purement liés à la performance du PPC. Nous excluons, par exemple, les aspects qualité ou

maintenance qui résultent d'autres systèmes de l'entreprise. Nous mesurons cette performance client avec :

- L'indicateur On Time Delivery (OTD) : il mesure la capacité de l'entreprise à respecter les délais demandés par les clients

$$OTD = \frac{\text{commandes livrées à temps}}{\text{nb de commandes total}} \times 100 \quad (1)$$

- La profondeur moyenne du retard : elle mesure en unités de temps l'ampleur de la dérive en cas de retard de livraisons.

$$Profondeur = \frac{\sum \text{retards en unités de temps}}{\text{nb de commandes en retard}} \quad (2)$$

- **La performance du système physique de production** (ressources) est évaluée avec :

- Le taux de charge : il indique le pourcentage d'heures travaillées sur le nombre d'heures disponibles. Comme évoqué précédemment, nous n'intégrons pas la problématique de la maintenance et n'intégrons pas l'ensemble des aléas pouvant réduire les heures de production réellement utiles comme le ferait le calcul du Taux de Rendement Synthétique. Ainsi le temps disponible correspond au temps d'ouverture en dehors des problématiques d'arrêts programmés ou aléatoires. La variabilité est intégrée directement sur les temps opératoires. Traditionnellement, on considère dans le monde industriel que plus l'indicateur est haut, plus les machines sont utilisées et donc les coûts unitaires réduits.

$$\text{Taux de charge} = \frac{\sum \text{heures réellement utilisées}}{\text{Temps disponible}} \times 100 \quad (3)$$

- La moyenne des temps de traversée (ou lead time) des ordres de fabrication par référence: c'est le temps écoulé entre le lancement d'un ordre et sa mise à disposition dans le stock. Cet indicateur, exprimé en unité de temps, pointe les dérives du système productif et permet, avec des analyses par référence, de comprendre la source des contreperformances en termes de délais client

$$\text{Avg Lead Time} = \frac{\sum_{i=1}^n Df_i - Dl_i}{n} \quad (4)$$

avec n = nombre d'ordres

Dl_i = Date de Lancement (mise en fabrication)

Df_i = Date de fin (= mise en stock)

- **La performance financière** : le système de production contribue à la performance globale de l'entreprise et notamment à la performance financière par le biais du niveau de stocks et d'en-cours.

- Le coût des stocks et en-cours : il est évalué en valeur en ajoutant la valeur des stocks et en-cours pour chaque article. Une référence utilisée dans la simulation peut être achetée ou fabriquée. La valeur des pièces en stocks est le coût d'achat pour les composants achetés. Concernant les références fabriquées, il s'agit de la somme de la valeur des composants (achetés ou fabriqués) et des heures de travail effectuées pour un produit (fini ou semi-fini). C'est un indicateur mesuré en continu lors des expériences, la valeur retenue est celle de la moyenne sur la durée de la simulation.

$$\text{coût des stocks} = \sum_{j=1}^r (Qs_j \times Cs_j + Qe_j \times Ce_j) \quad (5)$$

avec r = nombre de références

Qs_j = nombre de pièces en stock de la référence j

Qe_j = nombre de pièces en cours de production de la référence j

Cs_j = coût unitaire de la référence j en stock

Ce_j = coût unitaire de la référence j en cours de fabrication

- Le pourcentage des en-cours dans ce total : les en-cours représentent un double enjeu. Un enjeu financier par la somme qu'il représente, mais également un enjeu industriel majeur. D'après la loi de Little, une augmentation des en-cours conduit à l'allongement des délais qui fait dériver les

dates de livraison. Cet indicateur est donc essentiel dans l'évaluation de la performance du système de production.

$$\% \text{ encours} = \frac{\sum_{j=1}^r (Qe_j \times Ce_j)}{\sum_{j=1}^r (Qs_j \times Cs_j + Qe_j \times Ce_j)} \times 100 \quad (6)$$

avec r = nombre de références

Qs_j = nombre de pièces en stock de la référence j

Qe_j = nombre de pièces en cours de production de la référence j

Cs_j = coût unitaire de la référence j en stock

Ce_j = coût unitaire de la référence j en cours de fabrication

L'ensemble de ces indicateurs sont ensuite reportés dans le [Tableau III-5](#) présenté ci-après.

D4 Grille d'Analyse des indicateurs

Notre objectif est d'identifier les impacts d'un PPC sur la performance industrielle et d'en avoir une vision objective. Cette dernière est obtenue en comparant les performances annoncées par les promoteurs de la méthode, celles obtenues par des industriels lors de l'utilisation (in-vivo) et celles trouvées par simulation lors de la Phase Quantitative (in-vitro).

Tableau III-5 D4 Analyse des indicateurs

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée (Phase0)	Performance in vivo (Phase1)	Performance in vitro (Phase2)
Performance client	(1) OTD			
	(2) Profondeur du retard			
Performance du système industriel	(3) Taux de charge :			
	(4) Temps de traversée			
Performance financière	(5) Niveau total des stocks et en-cours			
	(6) Pourcentage des en-cours			

Ce tableau sera complété par des moyennes et, si possible, des intervalles permettant de rendre compte de l'amplitude de performance de chaque indicateur. Il sera accompagné de commentaires permettant d'analyser chaque indicateur en détail.

III-1.5 Analyse de la performance qualitative du PPC

Objectifs

La revue de littérature a montré que si les aspects quantitatifs de la performance des PPC sont largement traités, les aspects qualitatifs ne sont quasiment jamais évoqués. Nombre d'entreprises se lancent dans l'implantation d'un PPC fortes des succès quantitatifs obtenus par d'autres sans être réellement informées des enjeux du changement. Nous proposons par conséquent d'intégrer cet axe de travail dans notre méthodologie d'évaluation de la performance d'un PPC.

L'évaluation qualitative proposée a essentiellement pour but de faire ressortir les avantages et les inconvénients et/ou points d'attention du PPC et donc d'ajouter une dimension dans l'aide à la décision pour le choix d'un PPC.

Méthodologie de construction

En l'absence de repères méthodologiques clairement établis dans la communauté scientifique, concernant la performance qualitative des PPC, nous avons recours à l'analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats) qui est largement utilisée par les industriels pour construire le livrable D5. Elle

permet de réaliser une analyse des avantages/inconvénients en se plaçant du point de vue des utilisateurs en tenant compte du caractère interne ou externe de l'élément considéré.

Ce type d'analyse est adaptée pour une évaluation de performance qualitative cependant elle nous semble un peu restrictive. En effet, le changement ou l'intégration du nouveau PPC s'apparente à un projet pour l'entreprise. Dès lors, il nous paraît important de distinguer 3 phases : le choix du PPC, son implantation et son utilisation, car elles n'impliquent ni les mêmes personnes ni les mêmes processus ce qui impacte nécessairement l'analyse bénéfiques/risques et les recommandations qui pourraient être formulées.

Comme indiqué dans le [Tableau III-6](#), chacun des éléments insérés dans le tableau sera identifié par son code pour permettre son analyse dans les sous Bloc Phase Px-i. Contrairement aux tableaux de synthèse des livrables 1 à 3, le nombre d'éléments n'est pas déterminé a priori pour D5 puisqu'il est directement dépendant des résultats

Tableau III-6 D5 Analyses Bénéfices Risques

		Bénéfices/avantages	Inconvénients/Risque
Décision : choix du PPC	Interne	(1) (2)	(i)
	Externe	(i)	(i)
Phase d'implantation	Interne	(i)	(i)
	Externe	(i)	(i)
Phase d'utilisation	Interne	(i)	(i)
	Externe	(i)	(i)

D5 Analyse bénéfices/risques

Les différents arguments seront donc synthétisés dans un tableau à double entrée identique au [Tableau III-7](#) présenté ci-dessous. L'analyse bénéfices/risques sera effectuée en fonction de la phase considérée à savoir Implantation ou Utilisation.

Les bénéfices sont les avantages perçus par les utilisateurs et les entreprises qui utilisent le PPC. En ce qui concerne les risques, on comprendra les risques, qui peuvent être limités par des actions concrètes et les inconvénients réels qui sont inhérents au PPC.

Le contenu à indiquer pour chaque case correspond à une liste d'idées clés qui seront explicitées dans un descriptif pour permettre leur compréhension.

Tableau III-7 D5 Extrait Analyse Bénéfices/Risques pour MRP2

		Bénéfices/avantages	Inconvénients/risques
Décision : choix du PPC	Interne		
	Externe	Largement intégré dans les logiciels	Complexité du paramétrage
Phase d'implantation	Interne		Défaut de maîtrise des données Risque technique lors de la bascule
	Externe		Coût du support
Phase d'utilisation	Interne	Complétude du système	Complexité de la recherche d'information Instabilité du système
	Externe	Possibilité d'intégrer directement les données des Tiers	

Le livrable D5 est le cœur de l'évaluation qualitative et permettra notamment d'apporter des compléments d'information indispensables lors de la prise de décision pour le choix d'un PPC.

Les livrables D1 à D5 sont constitués au fil des itérations entre les phases du modèle. Afin d'assurer la traçabilité des résultats, un livrable D0-Historique de l'étude est établi.

III-1.6 Traçabilité de l'étude

Objectifs

Le livrable D0-Structuration de l'étude permet d'assurer la traçabilité de l'étude i.e. de répertorier l'ensemble des itérations et des interfaces à date, ce qui permet de :

- Centraliser les informations pour faciliter la codification
- Assurer le suivi des interfaces
- Faciliter le travail de ceux qui cherchent des compléments d'information à la lecture du rapport d'analyse.

Méthodologie de construction

D0-Structuration de l'étude est un tableau établissant la liste des itérations et des interfaces.

La codification est essentielle au suivi. Pour les itérations, nous utilisons celle proposée dans le paragraphe III-1 dont le format est Phase Px-i avec x numéro de la phase et i numéro d'itération. L'intitulé sera précisé.

Chaque itération est susceptible de générer des questions à traiter par les autres phases ou une nouvelle itération de la phase concernée. Ces questions, sont intégrées dans l'itération et utilisent un code comprenant en 1^{er} lieu le code de la phase ayant fait émerger l'interrogation, celui de la phase susceptible de traiter la question et enfin le livrable concerné. Le code P1►P2/D3 indique que la phase P1 a soulevé une question relative au livrable D3 Éléments constitutifs à traiter par la phase P2.

D0-Structuration de l'étude

D0 est le tableau de synthèse faisant apparaître l'historique des itérations et des interfaces en respect de l'ordre de réalisation. La structure est présentée dans le [Tableau III-8](#) ci-dessous.

Tableau III-8 Structure du livrable D0 Structuration de l'étude

Phase	Libellé	Intitulé / Objectifs visés
Px-i		
	Interface Px-Px/Dy	
	Interface Px-Px/Dy	
Px-i		

Ce tableau de synthèse se remplit au fil des itérations et doit respecter l'ordre chronologique des itérations. Les itérations Px-i sont mises en évidence tandis que les interfaces qui y sont liées seront explicitées en dessous sous forme de questions ou de remarques.

L'ensemble des livrables D0 à D5 sont incrémentés au fil de l'étude. La synthèse est effectuée au sein de D6 qui offre une vision à date de l'évaluation du PPC.

III-1.7 Synthèse de l'analyse

Objectifs

Contrairement aux autres livrables, le rapport d'analyse ne retrace pas l'historique de l'étude mais fait état de l'évaluation d'un PPC à un instant donné. C'est une capitalisation de la connaissance et il peut donc exister plusieurs versions de ce dernier livrable.

Il permet aux lecteurs de comprendre l'essentiel en quelques points clés et les renvoie aux livrables pour obtenir le détail.

Méthodologie de construction

Comme indiqué dans la présentation générale du modèle, ce travail de synthèse est l'aboutissement du cadre méthodologique proposé. Son objectif est d'offrir une synthèse objective de l'évaluation de la performance globale d'un PPC. Il s'appuie sur les autres livrables desquels il ne retient que les points essentiels.

Nous proposons donc une trame pour accueillir ce travail de synthèse. Plusieurs points doivent être abordés :

- Présentation du PPC : il s'agit d'une brève description retraçant l'historique, la philosophie sous-jacente et les principes de base.
- Livrables D1 à D5 : chaque livrable traite d'une thématique PPC en particulier. La synthèse que représente D6 intègre donc une partie pour chaque livrable permettant de traiter l'ensemble des thématiques.
- Recommandations : elles s'adressent principalement aux praticiens de la méthode en entreprise. Cependant elles peuvent également intéresser les académiques qui peuvent y trouver des réponses sur l'utilisation du PPC. Elles devront intégrer les aspects quantitatifs et qualitatifs pour les phases
 - o De choix,
 - o D'implantation,
 - o D'utilisation.
- Pistes de réflexion : Il s'agit des points soulevés lors de l'étude pour lesquels les réponses n'ont pu être apportées ou qui sont apparus suite au travail de recherche. Elles s'adressent aussi bien aux académiques qu'aux praticiens.

D6 Conclusion et Recommandations

L'idée est d'offrir, à un instant donné, une vision globale du PPC et de l'évaluation de sa performance issue de la capitalisation des connaissances acquise grâce à l'utilisation du cadre méthodologique. La structure globale du livrable est visible dans [Figure III-5](#) ci-dessous.

Les résultats synthétiques présentés dans D6 comporteront donc le code de la/des phases permettant le renvoi aux livrables et itérations concernés. Les détails des itérations sont présentés dans les livrables 1 à 5 auxquels le lecteur peut se référer pour approfondir sa réflexion.

D6-Conclusion et Recommandation PPC	
Présentation du PPC	
Délivrables (D1 à D5)	
Tableau Synthèse	
À Retenir	
Recommandations	
<ul style="list-style-type: none"> o Choix o Implantation o utilisation 	
Pistes de réflexion	



Figure III-5 Structure globale de D6 Conclusions et recommandations

La partie Présentation du PPC reprend en quelques points clés les éléments essentiels de la Phase P0-caractérisation. Il s'agit de permettre au lecteur de comprendre en quelques paragraphes les bases du PPC.

Pour chaque livrable de 1 à 5, le tableau de synthèse établi à la date de la rédaction est reporté dans D6. Il fait état de la connaissance sur la thématique concernée à date. Il inclut les codes permettant d'identifier le livrable et l'itération concernés afin d'accéder aux détails de l'étude. Pour chaque livrable, la partie À RETENIR fait état de quelques points clés sur la thématique concernée en les expliquant synthétiquement. Le lecteur averti pourra consulter le livrable concerné pour plus de détail. Les points clés peuvent évoluer en fonction de l'avancement de la connaissance nécessitant une actualisation.

Les parties **Recommandations et Pistes de réflexion** sont formulées à partir des résultats et des analyses menées tout au long de l'évaluation du PPC. Les recommandations sont articulées autour des 3 phases d'un projet PPC à savoir le Choix, l'implantation et l'utilisation. Ces deux parties se veulent **exhaustives compte tenu de l'état de la connaissance établi à date**. Le contenu doit être actualisé en apportant des précisions sur les points existants, en ajoutant ou supprimant des points. Des reformulations voire des contradictions entre versions de D6 peuvent apparaître en fonction de l'avancement de la connaissance.

Cette 1^{ère} partie du chapitre a été consacrée à la présentation générale du rapport d'analyse de la performance globale d'un PPC qui est l'objectif de notre méthodologie. Nous avons détaillé les 5 thématiques et leurs livrables associés sur lesquels nous nous appuyons afin de pouvoir évaluer la performance d'un PPC. Afin d'établir ce rapport d'analyse permettant l'évaluation de la performance globale d'un PPC, nous proposons un cadre méthodologique. Ce dernier est composé de 3 phases : P0 caractérisation, P1 étude quantitative, P2 Étude qualitative.

III-2 Cadre méthodologique pour la construction du rapport d'analyse

Le cadre méthodologique proposé permet d'alimenter l'ensemble des livrables qui ont été présentés dans le paragraphe précédent. Nous commençons par une vision globale de ce dernier avant de présenter plus précisément chaque phase qui le compose.

III-2.1 Présentation du cadre général

Le cadre méthodologique avait été présenté sous la forme d'un temple Lean afin de montrer l'importance de chaque élément à savoir : P0-caractérisation comme base indispensable, 2 phases d'égale importance P1-étude qualitative et P2-étude quantitative, et un objectif : le rapport d'analyse.

Cependant cette vision ne permet pas de montrer l'importance accordée aux interfaces ni la contribution constante au Rapport D'analyse. Ainsi, le cadre méthodologique proposé peut également être représenté par la

Figure III-6.

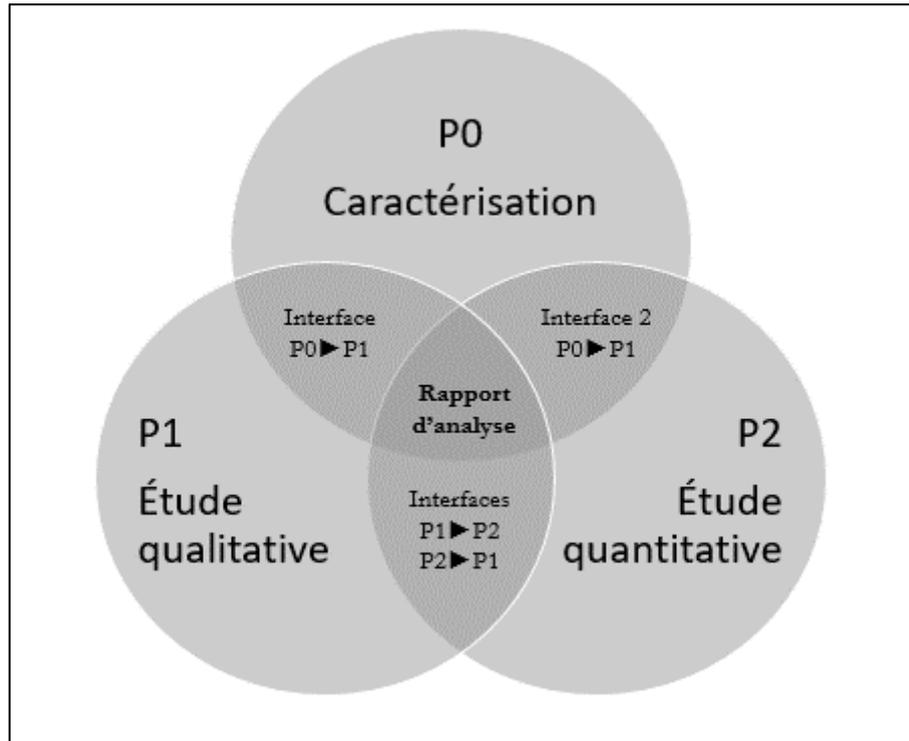


Figure III-6 Schéma global du cadre méthodologique proposé

Au centre du modèle se trouve le rapport d'analyse qui comporte 7 livrables. Il est constitué à partir des résultats obtenus au sein des 3 phases du cadre méthodologique qui sont :

- **P0-caractérisation** : elle amène les éléments de compréhension indispensables et permet de situer globalement le PPC étudié. Il s'agit d'une appropriation des concepts sous-jacents tels qu'établis par la communauté. Elle identifie les indicateurs de performance susceptibles d'être améliorés par l'adoption du PPC. Elle doit également permettre de déterminer les premiers points à éclaircir, c'est-à-dire soulever les premières questions quant à son utilisation concrète et le positionner par rapport aux PPC déjà connus.
- **P1-étude qualitative** : Elle doit permettre d'approfondir la compréhension du fonctionnement du PPC notamment en identifiant les contextes industriels favorables, les profils d'entreprises utilisatrices et les facteurs qui semblent influencer la performance. Elle identifie les performances obtenues tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif en s'appuyant sur les retours d'expérience. Elle est au centre de l'étude de la performance qualitative. C'est également le cœur de la comparaison entre les performances annoncées et celles obtenues dans des cas d'implantation réelle.
- **P2-étude quantitative** : L'objectif essentiel est d'identifier les paramètres ayant une influence sur la performance quantitative du PPC. Les paramètres étudiés peuvent être liés soit aux éléments constitutifs de la méthode soit aux caractéristiques de l'environnement industriel dans lequel le PPC est étudié. Un second objectif est également de participer à l'amélioration de la compréhension du PPC et de son fonctionnement.

Dans l'optique de réaliser le rapport d'analyse de la performance d'un PPC, un ordre logique s'impose. Le point d'entrée est la **P0-caractérisation**. Cette phase doit nécessairement être réalisée en premier lieu, car elle apporte les éléments nécessaires à la compréhension du PPC. Elle constitue le socle, alimente les 2 autres phases et le rapport d'analyse. Cette 1^{ère} phase peut être alimentée par de nouveaux éléments (nouvelles publications notamment) au fil de l'étude. Cependant, elle ne peut pas être remise en cause par les résultats obtenus dans les autres phases. Si des divergences apparaissent, elles seront traitées dans le rapport d'analyse qui a pour but de faire émerger ce type de résultats (écarts entre la vision prônée ou visée par les promoteurs de la méthode et les constats).

En ce qui concerne, P1 et P2, il n'y a pas d'ordre préférentiel, les deux s'enrichissent mutuellement et contribuent également au rapport d'analyse. Le modèle se veut itératif, ce qui signifie que des allers-retours peuvent être faits entre les deux études en fonction des résultats obtenus et du point d'entrée choisi.

La nature des échanges sera explicitée lors de la présentation de chaque type d'Étude. Les livrables du rapport d'analyse sont alimentés au fur et à mesure de l'avancée des phases à travers les différents résultats obtenus par chacune d'entre elles. L'articulation entre chaque phase et les autres éléments du cadre méthodologique doit être explicitée.

III-2.2 Articulation Phases-éléments du cadre méthodologique

Comme indiqué par le schéma, chaque Phase du cadre méthodologique interagit à plusieurs niveaux avec les autres éléments. D'une part, elle contribue à la constitution des livrables du rapport d'analyse et d'autre part, elle alimente les interfaces avec les autres Phases. La nature des informations transmises est différente.

En ce qui concerne, la constitution du rapport d'analyse, chaque phase génère des résultats intégrables au sein des livrables. La contribution plus ou moins intense des Phases aux livrables est présentée dans le [Tableau III-9](#). L'intensité de la contribution est proportionnelle au nombre de + indiqué dans le tableau : de 0 pour une absence d'influence à +++ pour une influence forte.

Délivrables \ Phase	Délivrables					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
Phase 0 : caractérisation	+++	+	+++	+	++	++
Phase 1 : Étude qualitative	+	++	++	+++	+++	+++
Phase 2 : Étude quantitative		+	++	+	+++	+++

D1 : périmètre fonctionnel, D2 : Grille descriptive, D3 : Synthèse Éléments Constitutifs, D4 : Grille d'analyse des indicateurs, D5 : Synthèse Bénéfices/Risques, D6 Conclusion et recommandations

Tableau III-9 Exemple de contribution attendue des Phases aux livrables

Le [Tableau III-9](#) est un exemple de contribution attendue des phases aux livrables cependant lors de l'utilisation du cadre ces contributions pourraient varier en fonction des informations disponibles sur le PPC étudié. On constate que les livrables sont tous alimentés par plusieurs phases. Chacun d'entre eux comporte plusieurs points et aucune phase ne peut les compléter en totalité. En conséquence, au sein d'un même livrable, les résultats issus des différentes phases peuvent être :

- **Additionnels** : une phase contribue au remplissage de points du livrable pour lequel les autres phases n'apportent pas d'information. Le résultat présenté est donc celui issu de cette phase.
- **Corroborants** : les résultats issus des différentes phases sur un même point sont identiques. Cela signifie que le résultat énoncé est validé par plusieurs éléments de l'étude.
- **Divergents** : les résultats sur un même point sont discordants. La partie Analyse du livrable fera état de la discussion et de ses conséquences sur la vision du PPC.

Afin d'assurer une traçabilité des résultats au sein des livrables, nous proposons pour chaque élément des tableaux de synthèse, d'indiquer quelles phases ont contribué au résultat et si le résultat de chacune est de type Additionnel, Corroborant ou Divergent.

Nous utiliserons un code correspondant à l'itération de la phase Px-i + l'initial du type, respectivement A, C et D (ex : P1-A pour un résultat Additionnel issu de la Phase 1- Étude qualitative). Dans le **cas de résultats divergents**, la phase dont la vision est retenue dans le tableau de synthèse sera mise en valeur par la mise en gras du code. Par exemple, le code « P0-1-A, **P1-1-D** » signifie que le **résultat retenu** a été obtenu grâce à **P1** en contradiction avec des résultats issus de P0. Afin de **mettre en évidence** ces contradictions au sein des tableaux de synthèse, les codes seront indiqués grâce à la couleur **Rouge**.

Nous avons présenté la structure du rapport d'analyse et de ses 7 livrables. Nous avons explicité l'articulation globale de notre cadre méthodologique qui doit permettre de constituer le rapport d'analyse.

III-2.3 P0-caractérisation et ses interfaces

Comme évoqué plus haut, P0-caractérisation est le point d'entrée du modèle, un passage obligé. Nous décrivons ici ses objectifs, ses liens avec les autres phases et avec le rapport d'analyse.

Objectifs

Cette 1^{ère} étape amène les éléments de compréhension indispensables pour mener à bien les phases suivantes et permet de situer globalement le PPC étudié. Il s'agit clairement d'une appropriation des concepts sous-jacents et de leur analyse primaire. Elle doit également permettre d'identifier les indicateurs clés de performance impactés par la méthode, de déterminer les premiers points à éclaircir, c'est-à-dire soulever les premières questions quant à son utilisation concrète, et le positionner conceptuellement par rapport aux PPC déjà connus.

Liens avec les autres phases du modèle

Contribution aux livrables du rapport d'analyse

Le travail réalisé dans la phase de P0-caractérisation permet normalement de réaliser totalement D1 et D3 et d'alimenter les autres en fournissant les éléments présentés dans le [Tableau III-10](#) :

Tableau III-10 Contributions Phase caractérisation et livrables

Phase Délivrable	Phase 1 : caractérisation
D1-Périmètre	Décisions impactées par le PPC. Permet de constituer la totalité de D1
D2-Grille descriptive	Éléments de la partie Description de la grille Hypothèses concernant la partie contexte industriel
D3-Éléments Constitutifs	Réalisation complète du livrable par identification et analyse des éléments du PPC (commentaires apportés par les autres phases)
D4-Analyse des indicateurs	Identifications des indicateurs impactés par le PPC
D5-Analyse Bénéfices/Risques	Identification des avantages mis en avant, des risques éventuels
D6-Conclusion et Recommandations	Éléments de cadrage

Concernant D4 et D6, des hypothèses peuvent être émises, elles sont transférées aux interfaces avec les P1 et P2 qui permettront de les confirmer ou non.

Alimentation des Interfaces

L'interface P0►P1 est celle qui existe avec P1-étude qualitative. P0-caractérisation pourrait identifier des questions quant à l'utilisation ou à l'implantation du PPC. Ces questions pourront être adressées dans P1-étude qualitative à des experts et/ou des utilisateurs qui préciseront le mode de fonctionnement et apporteront une vision plus précise de l'utilisation réelle.

De plus, P0 relèvera également les types et niveaux de performance attendus qui devront être confirmés par des résultats sur des cas réels qui sont analysés lors de P1.

L'interface P0►P2 est celle qui lie P0-caractérisation avec P2-étude quantitative. P0 soulèvera des questions quant aux facteurs pouvant influencer la performance. Des hypothèses seront faites et elles devront être validées lors de P2.

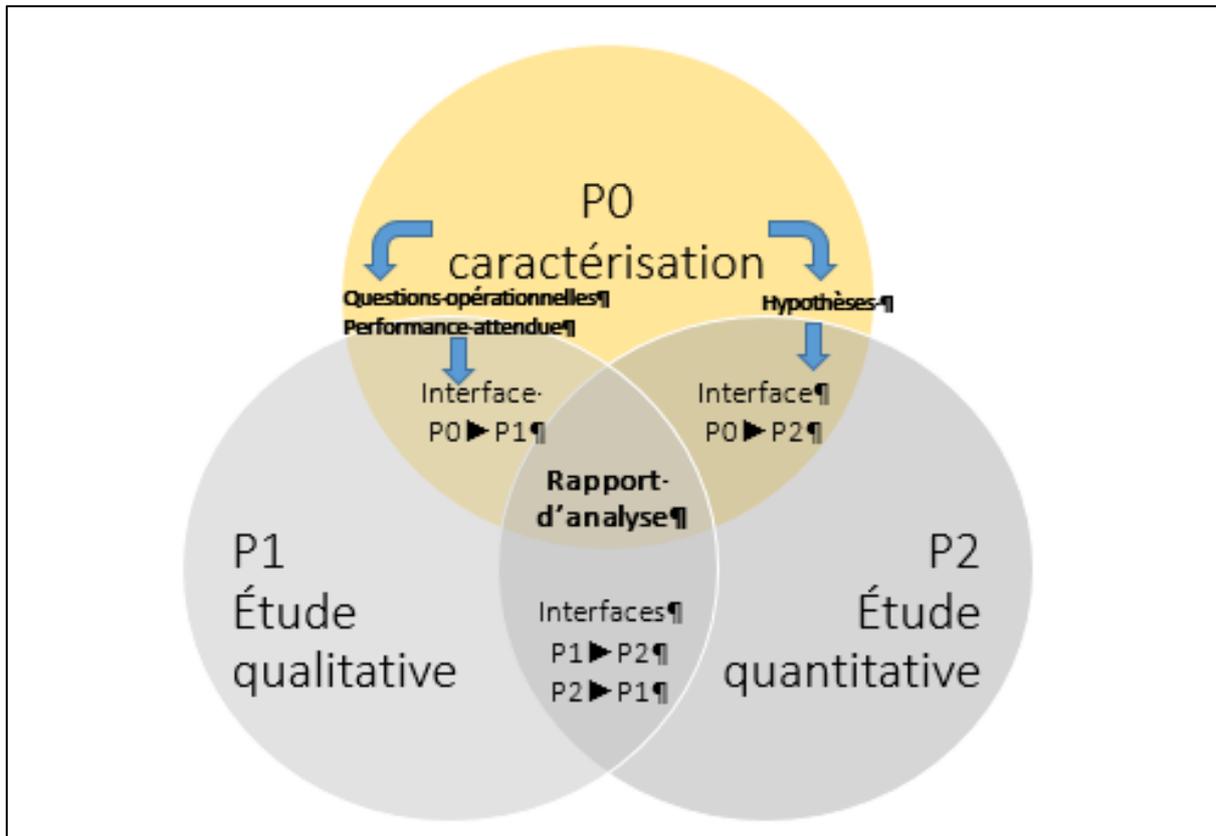


Figure III-7 Cadre général avec intégration des interfaces P0 → P1 et P0 → P2

D'après la Figure III-7, nous constatons, que ces interfaces entre la phase de caractérisation et les 2 autres sont à sens unique. Comme déjà précisé, P0 a pour but de faire ressortir l'essence même du PPC tel qu'il a été pensé. Si les autres phases de l'étude de la performance font émerger des contradictions, cela relève du rapport d'analyse et sera indiqué au sein des livrables grâce aux codes d'analyse des résultats évoqués plus haut. L'étude peut soulever les questions/contradictions, mais pas remettre en cause les fondements du PPC.

En conclusion, la phase de caractérisation permet une compréhension générale du PPC, i.e. une vision d'ensemble sur son fonctionnement et ses performances attendues. Elle est donc le point d'entrée de notre cadre méthodologique. Les Études Qualitative et Quantitative doivent ensuite permettre d'approfondir cette connaissance, c'est-à-dire en comprendre le fonctionnement précis et les enjeux, en mobilisant diverses sources et méthodologies.

III-2.4 P1-Etude qualitative

Cette phase étant particulièrement riche, nous nous concentrerons sur ses objectifs et son rôle au sein du cadre méthodologique. Les aspects méthodologiques (entrées, traitement, outils et livrables) seront présentés en détail dans le chapitre 4.

Objectifs

P1-étude qualitative a une visée descriptive du fonctionnement et de la performance du PPC. Elle doit compléter les éléments apportés par P0 notamment du point de vue :

- **Du contexte industriel.** Le lien entre contexte industriel et PPC a été mis en avant par la bibliographie. Plusieurs auteurs ont montré l'importance d'adapter le PPC en fonction de caractéristiques du contexte industriel. Dès lors, on peut penser que la performance du PPC repose, au moins en partie, sur son adaptation au contexte. P1 s'attachera donc à identifier les caractéristiques de l'environnement industriel favorable à l'utilisation du PPC et le profil des entreprises utilisatrices.

- **Des avantages et des inconvénients** du point de vue des utilisateurs et des experts. La bibliographie a montré que l'étude de performance des PPC est majoritairement vue sous l'angle quantitatif, les aspects qualitatifs étant souvent ignorés. Or la performance globale d'un PPC repose également sur la prise en main et la compréhension de l'outil par les utilisateurs. Le retour d'expérience lors des phases de choix, d'implantation et d'utilisation peut apporter un complément d'information essentiel notamment lors du choix d'un PPC.
- **Des performances obtenues sur le terrain.** P0 donne une vision de la performance attendue du PPC. P1-étude qualitative doit objectiver les résultats annoncés en identifiant les types et niveaux de performance atteints sur des cas réels.

Pour atteindre ses objectifs, différents types d'entrées sont mobilisés pour croiser les informations recueillies et les fiabiliser. Les méthodes de recherche associées sont de nature qualitative et là encore, nous avons fait le choix de multiplier les outils pour corroborer les résultats. Le détail sera présenté dans le Chapitre 4.

Contribution aux délivrables

En poursuivant ses 3 objectifs, P1 contribue à l'enrichissement de plusieurs délivrables. La nature des contributions attendues est présentée dans le [Tableau III-11](#) :

Tableau III-11 Contribution de P1-étude qualitative aux délivrables

Délivrable \ Phase	Contributions
D1-Périmètre	Validation du périmètre fonctionnel
D2-Grille descriptive	Profil des entreprises, Caractéristiques du Process, Hypothèses pour les autres caractéristiques du contexte industriel
D3-Éléments Constitutifs	Explicitation du rôle des éléments et des enjeux
D4-Analyse des indicateurs	Indicateurs impactés par le PPC en situation industrielle
D5-Analyse Bénéfices/Risques	Constitution du délivrable D5
D6-Conclusion et Recommandations	Recommandations issues des REX

Contribution à l'interface P1 ► P2

P1 apportera des hypothèses de travail sur les paramètres qui peuvent influencer la performance. Elles pourront ensuite être testées lors de la réalisation des plans d'expériences de P2. Les résultats issus de P1 peuvent ainsi servir d'entrées pour P2.

III-2.5 P2-Etude quantitative

Nous nous concentrons ici sur le rôle de P2 dans le cadre méthodologique proposé en nous focalisant sur ses objectifs et ses contributions. Les choix de modélisation nécessitent des développements importants qui seront présentés dans le chapitre 5.

Objectifs

L'objectif essentiel de P2-étude quantitative est **d'identifier les paramètres ayant une influence sur la performance du PPC**. Pour atteindre cet objectif, il faut mener des plans d'expériences basés sur les paramètres identifiés comme potentiellement influents sur la performance globale dans des **expérimentations in vivo et in vitro**. Le couplage des 2 types d'expérimentations doit permettre de corroborer les résultats obtenus. Les paramètres peuvent être liés soit aux éléments constitutifs de la méthode pour aider au paramétrage soit aux caractéristiques de l'environnement pour contribuer au positionnement du PPC

Le modèle doit, a minima, être capable de mesurer l'ensemble des indicateurs retenus dans notre cadre méthodologique. Comme présenté dans le paragraphe [III-1.4](#), nous en avons retenu 6 répartis en 3 axes.

Notre étude se veut descriptive et non explicative, il ne s'agit pas de quantifier la relation entre le paramètre et la performance, mais de relever son existence.

Cette phase pourra également permettre d'approfondir la connaissance sur le fonctionnement du PPC notamment en identifiant des comportements non décrits dans la littérature. Ces phénomènes pourront faire l'objet soit de confrontation à des retours d'expérience soit à une preuve de concept (POC) permettant de les comprendre. Le modèle devra donc permettre des allers-retours entre les 2 types d'expérimentations, à savoir : in-vivo et in-vitro afin de corroborer les résultats obtenus.

Contribution aux livrables

P2 apportera des réponses quant à l'existence d'influence entre des paramètres de l'environnement et contribuera à la meilleure compréhension du PPC. Le [Tableau III-12](#) indique les contributions entre P2 et les livrables :

Tableau III-12 Contribution de P2-étude quantitative aux livrables

Délivrable	Contributions
D1-Périmètre	
D2-Grille descriptive	Caractéristiques du contexte industriel pour lesquelles le PPC est performant
D3-Éléments Constitutifs	Identification de l'impact par plans d'expériences
D4-Analyse des indicateurs	Identification de l'impact par plans d'expériences
D5-Analyse Bénéfices/Risques	Identification de comportements anormaux du PPC
D6-Conclusion et Recommandations	Recommandations issues des plans d'expériences

Contributions à l'interface P2►P1

Les résultats de P2 peuvent soulever des interrogations quant au comportement du PPC et/ou à son paramétrage. Ces interrogations pourront être confrontées à l'avis des experts et/ou des utilisateurs pour une corroboration et/ou une analyse. Les résultats de P2-étude quantitative peuvent donc servir d'entrées à P1.

Le cadre méthodologique proposé vise à établir un rapport d'analyse de l'évaluation de la performance globale d'un PPC. Il s'appuie sur un modèle constitué de 3 Phases et de leurs interfaces. Un ensemble de 7 livrables a été élaboré afin de proposer une vision synthétique de cette évaluation. L'originalité de la proposition réside tout d'abord dans la combinaison d'approches qualitative et quantitative et l'existence d'interfaces permettant des allers-retours entre elles. Les tableaux de synthèses, les outils et les livrables du cadre sont également originaux. Ils ont pour objectif de faciliter l'analyse en proposant une base qui peut être enrichie selon les besoins.

Les 3 phases de notre cadre méthodologique et leurs interactions ont été présentées permettant de comprendre comment nous parvenons à l'objectif final qui est l'établissement du rapport d'analyse de la performance d'un PPC. Ce cadre se veut complet, mais plusieurs utilisations peuvent en être faites en fonction des objectifs poursuivis.

III-2.6 Un cadre méthodologique adaptable

Le cadre méthodologique proposé est adaptable à 2 points de vue : lors de son utilisation complète ce sont les itérations qui sont adaptables et lors d'utilisations partielles c'est le choix des phases qui le rend adaptable aux objectifs de l'évaluation et/ou à la nature du PPC étudié.

Cadre méthodologique complet : des itérations adaptables

Le cadre méthodologique a été présenté de façon linéaire pour plus de clarté. Si le point d'entrée est nécessairement P0 et le rapport d'analyse le point de Sortie, l'ordre entre P2 et P1 n'est pas imposé. Les préconisations sont de :

- Déployer les 2 en parallèle, car elles s'enrichissent mutuellement à travers les interfaces P1►P2 et P2►P1

- Multiplier les allers-retours entre les 2 en fonction des résultats obtenus. Cela permet de les enrichir en ayant eu recours à différentes approches. Chaque aller-retour est une itération. Le choix des itérations et de leur nombre est réalisé chemin faisant en fonction des résultats issus des itérations.

Le modèle complet est présenté dans la [Figure III-8 Cadre général et ensemble des interfaces](#). Les éléments indiqués en orange sont les contributions des phases aux interfaces.

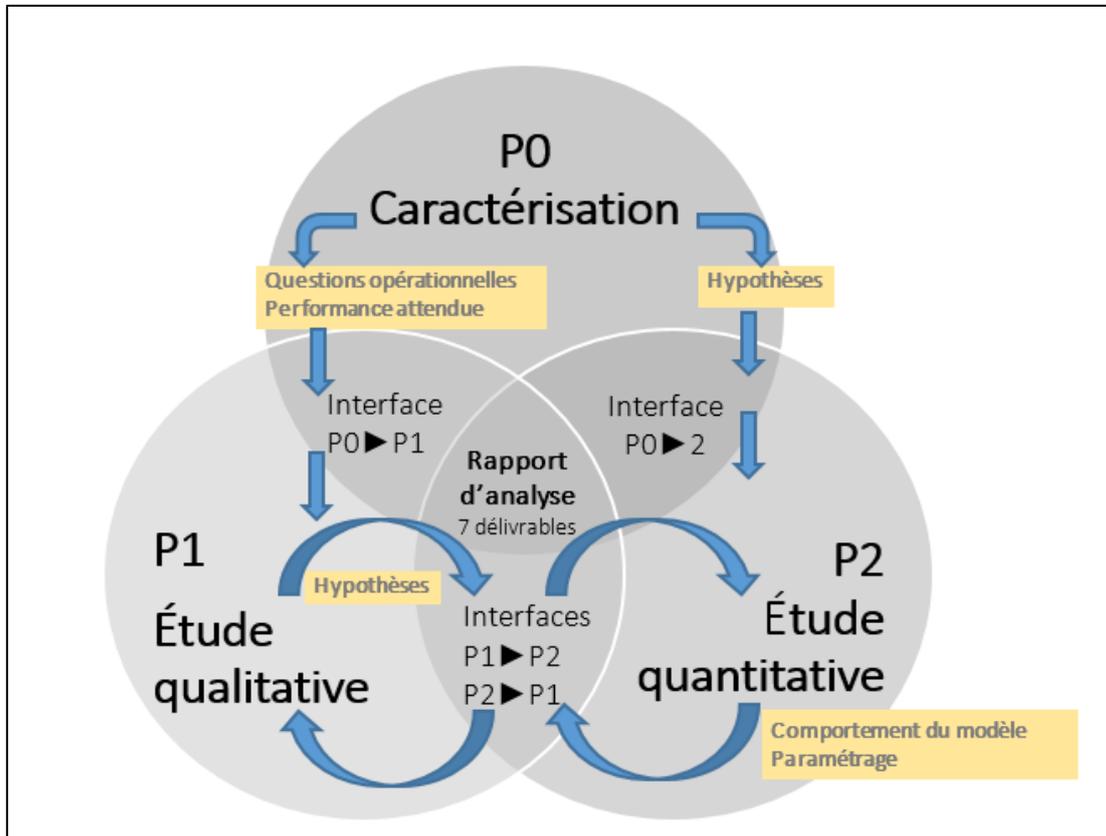


Figure III-8 Cadre général et ensemble des interfaces

Ainsi le **caractère adaptable** du cadre méthodologique proposé réside à la fois dans le **choix de l'ordre entre P1 et P2** mais également dans le **processus de l'étude** elle-même (nombre et nature des itérations réalisées). Ainsi chaque étude menée pour un PPC différent ne contiendra pas le même nombre d'itérations qu'une autre. D0 permet d'assurer la traçabilité et donc la lisibilité de l'étude réalisée.

Si le cheminement est adaptable, la nature des contributions de chaque phase aux déivrables est relativement prévisible. Le [Tableau III-13](#) les donne un exemple des contributions attendues, cependant il est possible que les résultats soient plus ou moins riches en fonction des études menées.

Tableau III-13 Exemple des contributions possibles entre phases et livrables

Phase \ Délivrable	D1 : périmètre Fonctionnel	D2 Grille descriptive	D3 Synthèse des Éléments Constitutifs	D4 Analyse des indicateurs	D5 Analyse Bénéfices/Risques
P0-Caractérisation	-Décisions impactées par le PPC. -Constitution de Délivrable	-Éléments de la partie Description de la grille (1 à -Hypothèses concernant la partie Contexte industriel	-Identification et analyse des éléments du PPC -Constitution du livrable	Identifications les indicateurs impactés par le PPC	
P1-étude qualitative	Validation du périmètre	-Profil des entreprises, -Caractéristiques du Process, -Hypothèses pour les autres caractéristiques du contexte industriel	Explicitation du rôle des éléments et des enjeux	-Indicateurs impactés par le PPC en situation industrielle	-Constitution du livrable
P2-étude quantitative		-Caractéristiques du contexte industriel pour lesquelles le PPC est performant	-Identification de l'impact des éléments par plans d'expériences	Identification de l'impact des paramètres par plans d'expériences	Identification de comportement anormaux du PPC nécessitant une prise en charge
D6 Conclusion et Recommandations	Définitions État des lieux utilisation, Recommandations issues des retours d'expériences terrain Recommandations issues des plans d'expériences				

Quelques exemples d'utilisations partielles possibles

L'originalité est que le modèle proposé peut également être utilisé de façon partielle soit parce que certains résultats pour un PPC donné sont déjà connus, soit parce qu'on souhaite se focaliser sur des aspects particuliers :

- Si l'on souhaite uniquement **acquérir des connaissances de base sur un PPC** et le situer globalement par rapport aux autres, la phase **P0** sera suffisante. Les trois premiers livrables : D1 Périmètre fonctionnel, D2 Grille d'analyse et D3 Synthèse des éléments constitutifs permettront d'en donner une vision générale.
- Si l'on veut se concentrer sur une **évaluation pragmatique de l'utilisation**, P0 ainsi que P1 seront mobilisées.
- Si l'on souhaite se concentrer sur les **aspects quantitatifs** de la performance, P2 sera privilégiée en fonction du degré de connaissances de l'utilisateur sur le PPC. Il s'agira de déployer de multiples expériences afin soit de valider des hypothèses sur les paramètres influençant la performance soit de quantifier la relation entre les paramètres et les indicateurs. Cette utilisation peut également être faite lorsque le **PPC est peu diffusé** dans les entreprises, ce qui est notamment le cas s'il est récent.

Dans tous les cas de figure, P0 et le rapport d'analyse devront être réalisés, mais le nombre et le contenu des livrables devront être adaptés aux objectifs. **Le cadre méthodologique** proposé est donc également **adaptable en termes de choix des phases à utiliser compte tenu des objectifs et de la nature du PPC étudié**. Dans ces cas d'utilisation partielle, le cadre méthodologique **conserve une valeur ajoutée** même si la démarche s'apparente alors à des méthodes scientifiques courantes. Il propose, en effet, des **outils d'analyse originaux** qui permettront une synthèse rapide et éventuellement des **comparaisons avec d'autres PPC**.

Nous avons détaillé l'ensemble du cadre méthodologique proposé et l'articulation de ses 3 phases. La structure du rapport d'analyse qui en découle et de chaque livrable a été explicitée. La mise en œuvre de la totalité du cadre nécessite une appropriation de la méthodologie originale proposée concernant les Phases P1 et P2 qui seront donc développées dans les chapitres 4 et 5. La phase de P0 que nous proposons s'appuie sur des méthodes reconnues mais propose des outils de synthèse originaux. Nous en présentons le contenu dans le paragraphe suivant.

III-3 Détails méthodologiques de la Phase P0-Characterisation

P0 est le socle de notre méthodologie. Elle a pour but essentiel de se familiariser avec le PPC en s'en appropriant les concepts et en faisant émerger les premiers questionnements. Elle s'appuie sur 2 sous-phases mobilisant chacune des entrées différentes.

III-3.1 P0-1 Appropriation des concepts

La 1^{ère} sous-phase consiste à s'approprier les concepts de base de la méthode tels que décrits par les auteurs dans leurs diverses publications. S'agissant de nouveaux PPC, l'identification des ouvrages de références n'est pas très difficile. Ils peuvent émaner de scientifiques, d'entreprises ou de professionnels. De ce fait, les publications peuvent être de plusieurs natures : publications scientifiques (articles de revue ou de conférence), livres, conférence ou encore site Web. Toutes les principales publications devront être retenues, les doublons exclus.

Pour les PPC plus anciens, remonter aux sources initiales n'aura pas toujours de sens. Il s'agira alors de retrouver les publications principales qui décrivent le PPC tel que majoritairement utilisé ou dans la forme que l'on souhaite étudier (ex : MRP2 sous incertitude).

La lecture des ouvrages de base du PPC donne une première approche théorique. Plusieurs points devront être travaillés. Tout d'abord, l'historique du PPC et sa définition générale, il s'agit de la justification de la méthode et des objectifs poursuivis. Ce 1^{er} point alimente les livrables 1-Périmètre Fonctionnel, 2-Grille descriptive. Il s'agit ensuite d'identifier les concepts et mécanismes utilisés ce qui contribue aux livrables D3 Éléments Constitutifs et enfin les types et niveaux de performance attendus qui alimentent D4-Analyse des indicateurs.

À ce stade la contribution aux livrables est peu avancée et probablement biaisée par la nature des ouvrages considérés. Cette première approche théorique sera donc complétée par une revue de littérature systématique.

III-3.2 P0-2 État de l'art

L'État de l'art donne une vision globale des publications académiques sur le sujet et sur les thématiques abordées. Nous proposons, de recourir à une revue de littérature systématique lorsque cela est possible. La méthodologie décrite par (Kitchenham, 2004) sera utilisée pour conduire les recherches. Bien que non spécifique au domaine du génie industriel, elle permet de mener l'étude de façon robuste et propose une structure pour le livrable. Trois étapes principales sont proposées :

- **Planifier la revue de littérature** : identification du besoin d'une revue systématique et développement d'un protocole de recherche,
- **Mener l'étude** :
 - o Identification de la recherche,
 - o Sélection des études primaires,
 - o Évaluation de la qualité des études,
 - o Extraction des données,
 - o Synthèse des données,
- **Établir un rapport de synthèse.**

Pour notre cadre méthodologique, l'objectif identifié de la revue de littérature est d'établir une synthèse des types de publications disponibles et des thématiques abordées.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons le protocole suivant :

- **Identification des mots clés liés au PPC étudié.** Il faudra déterminer l'ensemble des appellations sous lesquelles le PPC peut être trouvé. Une attention particulière doit être portée aux acronymes, à l'utilisation d'espaces entre les caractères, l'utilisation du pluriel ou de traduction dans d'autres langues.

- **Recherche sur différents moteurs de recherche et base de données** adaptés au domaine du Génie Industriel : Scopus, Web of Science, Science Direct, IEEE, Google Scholar, HAL, Semantics Scholar
- **Recensement** de l'ensemble des publications par base de données.
- **Élimination** :
 - a. Doublons,
 - b. Langues non maîtrisées,
 - c. Inaccessibilité des documents. Certains sont seulement répertoriés, mais sans accès au texte intégral ni même au résumé. Dans ce cas, il n'est pas possible d'intégrer la publication.
- **Détermination de la pertinence des publications et raffinage** : lecture rapide des communications : résumé, mots clés, introduction et conclusion. Certaines publications seront exclues, car elles citent seulement le PPC sans traiter réellement le sujet.
- **Analyse des publications**. Des éléments standard seront recensés comme : auteurs, années, type de source. Concernant les types de sources, nous distinguons les Articles de Conférence, Articles de revue scientifiques, Thèses, Master.
- **Analyse des contenus** : elle repose sur 2 éléments :
 - o La thématique de recherche : elle sera déterminée à partir d'une liste que nous avons établie parmi celles traditionnellement abordées concernant les PPC : étude comparative avec d'autres PPC, revue de littérature, étude de l'applicabilité, étude conceptuelle, étude sur les modalités d'implantation, paramétrage, considérations opérationnelles. Cette liste ne peut pas être exhaustive, car avec de nouvelles études, de nouvelles thématiques pourraient apparaître.
 - o La ou les méthodologie(s) de la recherche utilisée(s) dans la publication : nous avons identifié 9 méthodologies de recherche mobilisées dans le cadre des études sur les PPC : étude simulateur in vitro, étude simulateur in vivo, modélisation mathématique, autres techniques quantitatives, étude de cas d'implantation, enquêtes et interviews, survey, analyse conceptuelle et revue de littérature.

Nous proposons de recenser les différentes publications dans un tableau identique au [Tableau III-14](#) afin d'en présenter les principales caractéristiques.

Tableau III-14 Proposition de tableau de recensement de la littérature PPC

auteur	Type de sources	Année	Thématique	Méthodologie															
				Quantitative				Qualitative				Total							
				Étude simulateur in vitro	Étude simulateur in vivo	Modélisation	Quantit autre	Étude de cas Implantation	Enquêtes et interviews	Survey	Analyse conceptuelle		Revue de littérature						

À l'issue du recensement, des traitements « statistiques » pourront être effectués, notamment en ce qui concerne l'évolution du nombre de publications dans le temps, les types de sources, les méthodes mobilisées, et surtout les thématiques étudiées. Ce dernier élément peut contribuer à identifier certains enjeux liés au PPC considéré et donc alimenter D3-Éléments Constitutifs et les interfaces avec P1 et P2 en leur fournissant des hypothèses.



L'analyse de contenu permettra également d'étudier les types et niveaux de performance relevés dans la littérature (D4-Analyse des indicateurs) ainsi que les enjeux pointés par les chercheurs du point de vue du fonctionnement du PPC (D3-Elements Constitutifs).

Conclusion

L'étude de la performance globale d'un PPC, notamment dans le contexte VUCA, nécessite un cadre méthodologique robuste.

Nous faisons, dans ce chapitre, une proposition reposant sur 3 phases ; une Phase de caractérisation, une étude qualitative et une étude quantitative incluant des itérations. PO-caractérisation est le point d'entrée de notre cadre méthodologique. Nous en avons présenté les détails méthodologiques. À l'issue de cette phase, l'utilisateur doit avoir compris l'essence du PPC, son fonctionnement général ainsi que les enjeux qui y sont liés. Cette phase est donc capitale et doit être effectuée avec la plus grande attention.

L'utilisation du cadre permet la réalisation d'un rapport d'analyse constituée de 7 livrables. Chacun des 5 premiers livrables correspond à une thématique particulière qui contribue à la compréhension et l'analyse de la performance du PPC étudié. Le contenu est issu des analyses menées dans les phases. La nature des contributions aux livrables a été explicitée.

La valeur ajoutée du cadre méthodologique repose dans la proposition des livrables, mais également dans l'approche couplée entre études qualitative et Quantitative qui est peu commune dans le domaine des PPC. Nous avons donc détaillé dans ce chapitre 3, le cadre méthodologique, les livrables, les interactions et la phase de caractérisation. Le détail des Études Qualitative et Quantitative est explicité respectivement dans les chapitres 4 et 5.



Chapitre IV

Étude qualitative

<u>IV-1</u>	<u>STRUCTURATION DES THÉMATIQUES LIÉES AUX PPC</u>	86
<u>IV-2</u>	<u>LES DIFFÉRENTES SOURCES D'INFORMATIONS MOBILISÉES</u>	88
<u>IV-3</u>	<u>PROPOSITION D'UNE GRILLE « THÉMATIQUES PPC PAR SOURCES »</u>	92
<u>IV-4</u>	<u>LES RÉSULTATS DE LA PHASE P1-ÉTUDE QUALITATIVE</u>	94
	IV-4.1 Base de données pour la synthèse des cas industriels	94
	IV-4.2 Contributions aux livrables du rapport d'analyse	95
	IV-4.3 Contribution aux entrées de P2-étude quantitative via interface P1 ► P2	96
<u>CONCLUSION</u>		97

RÉSUMÉ

Le cadre méthodologique proposé afin d'évaluer la performance globale d'un PPC combine 3 phases : P0-caractérisation, une Étude qualitative, une étude quantitative qui conduisent à la réalisation d'un rapport d'analyse constitué de 7 livrables. Le descriptif général, les 7 livrables et le détail de P0-caractérisation ont été présentés au sein du Chapitre 3. Les phases P2-étude quantitative et P2-étude qualitative nécessitent des développements plus détaillés.

Ce 4^e Chapitre sera donc dédié à la présentation approfondie de P1-étude qualitative qui est proposée dans notre cadre méthodologique. Nous rappellerons d'abord son intérêt, ses objectifs et son organisation générale. Nous poursuivrons par une proposition de thématiques PPC à aborder dans le cadre de P1-étude qualitative (1), puis par la présentation des sources d'informations mobilisables, leur sélection et les traitements et outils utilisés pour les exploiter (2). Nous proposerons ensuite une grille croisée entre thématiques et sources (3) et nous conclurons par la présentation des résultats attendus de cette phase (4)

L'objectif de notre cadre méthodologique est d'offrir une évaluation globale de la performance d'un PPC. Notre approche combine 3 phases (P0-caractérisation, P1-étude qualitative et P2-étude quantitative) qui participent à la construction d'un rapport d'analyse de la performance globale du PPC.

La phase P1, dont il est question dans ce chapitre, est au cœur de l'évaluation de la performance qualitative. Elle apporte une **vision pragmatique du PPC et confronte la vision théorique issue de P0 à la réalité des entreprises utilisatrices**. Elle a donc pour vocation de faire émerger les résultats qualitatifs constatés sur le terrain et de souligner les divergences entre la théorie et l'utilisation réelle. Elle poursuit donc plusieurs objectifs :

- **Identifier les avantages et les inconvénients** de ce PPC lors des différentes phases de sa mise en œuvre i.e. choix, implantation et utilisation. Il s'agit d'obtenir des réponses les plus objectives possibles à cette question. C'est le cœur de l'étude de la performance qualitative.
- **Acquérir une compréhension plus précise du PPC et de sa mise en œuvre** afin de formuler les conclusions et recommandations: P0 apporte les éléments théoriques du fonctionnement du PPC, mais également de potentielles questions sur la mise en pratique. P1 doit fournir des réponses pratiques à ces questions : comment les utilisateurs s'approprient-ils le PPC dans le processus de planification et de contrôle ? des adaptations sont-elles nécessaires ? quel rôle jouent les éléments constitutifs de la méthode ? quels sont les facteurs clés de succès ? ... La liste n'est pas exhaustive, P1-étude qualitative doit également permettre d'en faire émerger de nouvelles.
- **Identifier les contextes industriels et les profil-types d'entreprises** qui s'intéressent au PPC. P0 donne une première idée, il s'agit ici de la confronter à la réalité terrain pour voir si le PPC est utilisé au-delà des environnements initialement prévus ou, inversement, s'il s'avère inutilisable dans certains cas.
- **Confirmer ou infirmer le périmètre identifié** : il s'agit de vérifier si les entreprises utilisent l'ensemble des fonctions PPC identifiées lors de P0 ou bien si l'utilisation est restreinte à certaines fonctions.
- **Objectiver la performance** : P0 permet d'identifier les indicateurs censés être impactés par la mise en place du PPC. Afin d'offrir la vision la plus objective possible P1 doit :
 - o Comparer les résultats annoncés par les promoteurs de la méthode à ceux obtenus lors d'implantations réelles.
 - o Rechercher l'existence d'autres impacts potentiels tant du point de vue quantitatif et qualitatif. Toujours dans un souci d'objectivation, les contreperformances devront également être considérées.

À travers la poursuite de ces différents objectifs, **P1-étude qualitative alimente tous les livrables notamment en apportant des éléments permettant de formuler des conclusions objectives et des recommandations pertinentes issues de retours d'expériences**. De plus, elle fournira des hypothèses à tester dans les plans d'expériences afin de valider l'existence de certains phénomènes constatés sur le terrain.

Pour atteindre cet objectif, la méthodologie proposée dans ce chapitre s'appuie sur l'utilisation combinée de différents types de sources et d'outils afin de collecter un maximum de retour d'expériences d'utilisation du PPC. Les outils développés et les modes de traitement sont établis en accord avec les principes de (Miles and Huberman, 2017). Afin de faciliter la collecte, nous avons développé un Guide thématique. Nous présenterons d'abord la structuration de ces thématiques générales liées à l'étude des PPC. Nous détaillerons ensuite les sources mobilisables pour recueillir les retours d'expériences.

IV-1 Structuration des thématiques liées aux PPC

Les objectifs de P1 présentés plus haut sont génériques. Il nous paraît essentiel de les décliner en fonction de thématiques à aborder dans le cadre des PPC.

Nous avons choisi d'analyser les PPC au travers du prisme de la hiérarchisation temporelle. Nous reprenons ici cette approche en regroupant les informations recherchées en fonction de l'horizon temporel concerné (Stratégique, Tactique et Opérationnel). La présentation qui est faite ici donne des exemples de questions qui peuvent être posées dans le cadre de l'étude de chaque thématique. **Le découpage proposé**

donne lieu à la rédaction d'un **Guide thématique** qui est disponible en Annexe 1. **Ce dernier est utilisé pour l'analyse de l'ensemble des sources** de P1-étude qualitative.

Au niveau stratégique, les thématiques concernent essentiellement la phase de choix du PPC. L'objectif est de comprendre le contexte de l'adoption d'un PPC et de son extension. Cela nous renvoie à 4 thématiques :

- **Thématique Stratégique 1 (TS1) - Justification de l'adoption du PPC** : quels sont les éléments qui ont poussé l'entreprise vers l'adoption du PPC étudié ? La nature des informations est très variable et la genèse d'un projet souvent complexe à décrire. Il s'agit de faire remonter les arguments qui ont conduit l'entreprise à tester ou changer totalement de PPC.
- **TS2- Caractéristiques de l'entreprise** : il s'agit de travailler sur les caractéristiques des entreprises utilisatrices du PPC afin d'identifier celles qui semblent favorables au PPC : taille, secteur d'activité, pays...
- **TS3- Organisation industrielle de l'entreprise** : quelle est l'organisation industrielle des entreprises utilisatrices, il s'agit d'identifier les caractéristiques-clés du contexte industriel des entreprises utilisatrices : stratégies de réponse à la demande, organisation d'atelier, flux poussés ou tirés...
- **TS4- Projets de développement futur** : l'entreprise *souhaite-elle* étendre le périmètre de l'utilisation du PPC ? Si oui grâce à quels résultats ? Si non pour quelles raisons ? Ce retour d'expérience alimentera les livrables D4 et D6.

Au niveau tactique, les informations à chercher sont celles qui concernent la phase d'implantation du PPC autrement dit la phase projet. Les thématiques à aborder sont :

- **Thématique Tactique (TT1) - Le périmètre du projet** : l'objectif est d'identifier l'ampleur du PPC au sein de l'entreprise, est-il utilisé en remplacement complet d'un autre système ? est-il au contraire restreint à certaines références ? si tel est le cas, quelles sont les caractéristiques qui ont permis de choisir les références concernées...La liste ne se veut pas exhaustive. L'objectif est d'alimenter le livrable D2-Grille d'analyse des caractéristiques en apportant des précisions quant aux contextes industriels favorables et aux limitations du PPC étudié.
- **TT2- L'accompagnement et formation** : l'entreprise a-t-elle fait appel aux services d'un cabinet de conseil ou autres experts pour déployer le PPC ? La présence d'experts internes est-elle suffisante ? Faut-il suivre des formations ? De quelle nature ? Quelles sont les compétences nécessaires à l'utilisation du PPC ? ... L'intérêt de cette thématique est de pouvoir formuler des recommandations pratiques (D6).
- **TT3- La durée du projet** : c'est la durée entre le lancement et l'utilisation effective. Dans le cas d'un projet pilote qui aurait été étendu par la suite, les précisions sur les différentes durées (pilote puis extension) peuvent être utiles dans le cadre des recommandations à des praticiens.
- **TT4- Les outils** : il est utile dans le cadre des recommandations de connaître les outils (informatique ou non) utilisés, voire développés dans le cadre de la mise en œuvre puis de l'utilisation d'un nouveau PPC au sein d'une entreprise. Là encore, l'idée est d'alimenter les recommandations si des tendances se dessinent.
- **TT5- Le retour d'expérience sur la phase projet** : quels résultats ont été obtenus d'un point de vue qualitatif et quantitatif ? Quels conseils sont formulés à de futurs utilisateurs ?

Enfin du point de vue **opérationnel**, nous nous concentrons sur la phase d'utilisation. Plusieurs points seront étudiés :

- **Thématique Opérationnelle (TO1) - L'utilisation concrète du PPC** : l'objectif est d'obtenir le ressenti des utilisateurs par rapport au processus de planification et de contrôle. Les éléments porteront sur la facilité d'utilisation, l'intégration des concepts sous-jacents, les avantages et les inconvénients perçus, la nécessité d'adapter la méthodologie proposée par le PPC...
- **TO2- Les outils utilisés** : cette thématique concerne les outils mobilisés par les utilisateurs dans le cadre du processus de planning et contrôle. Des outils existent-ils ? qu'en est-il de l'ergonomie, de l'intégration avec les outils existants, de la nécessité ou non de développer des outils supplémentaires

- **TO3- Les résultats quantitatifs** : quels sont les résultats obtenus sur les 3 axes de la performance? Sont-ils cohérents par rapport aux résultats issus de la phase P0. D'autres indicateurs quantitatifs sont-ils impactés ? Les utilisateurs constatent-ils des phénomènes non explicités par le PPC ?
- **TO4- Les résultats qualitatifs** : quels sont les retours d'expériences (REX) positifs et négatifs liés à l'utilisation du PPC ? Quelles sont les recommandations que les utilisateurs formuleraient pour obtenir les meilleurs résultats et éviter les écueils.

Ce **Guide thématique** regroupe les différentes thématiques à aborder pour obtenir des résultats de nature qualitative. Pour collecter les informations, plusieurs sources sont utilisables. Dans tous les cas, nous nous appuyons sur le **Guide méthodologique** pour récolter les données. Il est possible que des thématiques ou des aspects complémentaires apparaissent au fil de la recherche. Ils sont ajoutés au guide et contribuent ainsi à son enrichissement.

Le guide thématique que nous avons développé a pour objectif de guider la collecte des informations issues de différents types de retour d'expérience. Les sources mobilisables et les outils développés utilisés pour collecter les retours d'expériences sont présentés dans le paragraphe suivant.

IV-2 Les différentes sources d'informations mobilisées

Afin d'éviter certains biais inhérents aux études qualitatives exploratoires, nous proposons de multiplier les sources afin de corroborer les résultats.

Dans le cadre de P1-étude qualitative, notre méthodologie s'appuie sur l'utilisation de **différents types de sources**. Ces dernières peuvent être regroupées en fonction de 2 critères. Le 1^{er} s'appuie sur leur **caractère Interne ou Externe** au cadre méthodologique proposé. Les sources internes sont celles qui émanent des autres phases du modèle (P0 et P2). Les sources externes sont celles qui sont propres à P1.

Le 2^{ème} critère de tri des sources repose sur leur nature. On distinguera les sources **documentaires et les sources terrain**. Les premiers comprennent des documents de toutes natures (publications papier, Web, conférence) qui peuvent être étudiés indépendamment de leurs auteurs. Les secondes, dites **sources terrain font, au contraire, interagir directement le chercheur et sa source**. C'est le cas lors des interviews et des visites sur sites industriels. Le [Tableau IV-1](#) replace des exemples de sources au sein de cette typologie.

Tableau IV-1 Typologie des sources de la phase P1

Sources	Internes au cadre méthodologique	Externes au cadre
Documentaires	<i>Phase de caractérisation</i> <ul style="list-style-type: none"> - Résultats de la phase - Sources : Publications faisant référence à des cas réels <i>Interface P2 ► P1 : étude quantitative</i> <ul style="list-style-type: none"> - Résultats de la phase 	Publications d'études de cas des promoteurs du PPC Conférences des entreprises utilisatrices du PPC
Terrain		Interviews Visites sur site

Notons qu'il n'a pas de sources internes faisant appel au terrain car les phases P0 et P2 n'utilisent pas ce type de source.

Nous avons présenté l'ensemble des sources potentiellement utilisables pour P1-étude qualitative. Toutes ont pour objectif de faire remonter des informations issues de retours d'expériences de l'utilisation réelle du PPC. Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons chacune des sources en faisant état de leur intérêt, de la méthode utilisée pour sélectionner puis traiter les sources et enfin des biais existants pour chacune d'entre elle.

L'interface P0►P1 : résultats de la phase P0 caractérisation

La phase P0 permet d'acquérir un niveau de compréhension suffisant sur le PPC pour permettre au chercheur d'orienter le travail lors de P1-étude qualitative. Elle permet notamment de :

- **Soulever des interrogations** quant à l'implantation et au fonctionnement du PPC en situation industrielle,
- **Identifier les types et niveaux de performance attendus.**

Ces résultats sont transférés à P1-étude qualitative via l'Interface P0►P1, et constituent la base de la réflexion pour l'instanciation des outils utilisés par P1. Comme indiqué au Chapitre 3, ils sont inscrits dans la partie Interfaces des livrables correspondant pour faire état des éléments manquants. Ils doivent également permettre d'enrichir le Guide thématique en précisant les questions clés à poser en fonction du PPC considéré.

L'interface P2►P1 : résultats P2-étude quantitative

Comme évoqué lors du chapitre 3, le cadre méthodologique proposé ne définit pas un ordre précis entre les Études Qualitative et Quantitative. Nous préconisons des allers-retours entre les 2 pour qu'elles s'enrichissent mutuellement. Au fil de l'évaluation du PPC, des éléments issus de la phase étude quantitative peuvent ainsi nécessiter une validation par P1. Dans ce cas, ces éléments de réflexion sont inscrits dans la partie Interfaces des livrables correspondants, ce qui permet d'assurer leur traitement ultérieur. Nous avons ainsi principalement :

- Des résultats quantitatifs obtenus: sont-ils cohérents avec ceux trouvés dans les cas réels ?
- L'identification de certains comportements du PPC : la simulation peut faire émerger des phénomènes non décrits dans P0-caractérisation. Dans ce cas, l'interface P2►P1 permet d'enrichir le guide méthodologique en ajoutant des thèmes à investiguer ou des questions précises à poser afin de confirmer ou infirmer l'existence de ces phénomènes dans la pratique industrielle.

Les publications d'études de cas par les « promoteurs » du PPC

Les promoteurs de la méthode sont principalement des cabinets-conseils qui accompagnent des entreprises sur des projets d'implantations ou du développement du PPC étudié.

Une recherche Web intégrant les mots clés du PPC associés avec « Résultats », « accompagnement » ou « expérience » conduisent aux cabinets qui appliquent le PPC chez leurs clients. Selon le niveau de développement du PPC, il peut y avoir plus ou moins de résultats. Si les résultats sont peu nombreux alors la sélection est faite naturellement. Si les résultats sont pléthoriques, il faut se concentrer sur le nombre de cas que l'entreprise présente pour l'intégrer dans le panel. On ne sélectionnera que ceux qui ont un nombre d'expériences significatif ou un profil original.

Une fois la sélection réalisée, les informations collectées sont celles des exemples donnés par les cabinets sur leurs sites. La forme peut différer (une simple page Web, une étude de cas de plusieurs pages, un Webinaire), on étudiera avec attention les récits ou présentations afin de collecter les informations en lien avec le **guide thématique**.

Les publications académiques centrées sur les études de cas réelles

Les publications académiques sont répertoriées lors de la phase de caractérisation. Au sein de P1, il s'agit donc de filtrer celles qui concernent des cas de mise en place réelle et qui traitent de la performance quantitative et/ou qualitative et de les étudier. L'objectif est de relever les données relevant du périmètre de l'étude de la performance quantitative ou qualitative d'un PPC (choix, implantation et utilisation).

L'exploitation des données est la même que pour les autres documents à savoir relever des données en fonction du guide thématique, tout en conservant la possibilité d'enrichir ce dernier au besoin.

Les conférences des entreprises utilisatrices du PPC

Certaines entreprises qui utilisent un nouveau PPC souhaitent communiquer leur expérience. Une simple recherche Web semble difficilement utilisable dans ce contexte, la difficulté étant de dégager les résultats pertinents parmi la masse d'informations résultant d'une recherche portant sur une utilisation par

des industriels d'un PPC. Souvent les résultats obtenus renvoient à la théorie du PPC étudié ou alors à des sites de Cabinet-Conseil spécialisés dans le domaine.

Dès lors, pour approcher les entreprises utilisatrices, nous proposons de nous concentrer sur les **conférences professionnelles** qui intègrent des présentations liées au PPC objet de l'étude. Si la problématique est porteuse, un certain nombre d'entreprises souhaitera faire valoir son dynamisme en exposant ses résultats à la communauté professionnelle. Ces conférences peuvent être suivies en direct dans le cadre de rassemblement professionnel comme des salons, mais aussi en ligne grâce des Webinaires en direct ou la mise à disposition de vidéos.

La sélection peut se faire en intégrant les réseaux professionnels : association, réseaux sociaux professionnels comme Twitter ou LinkedIn. Les fils d'actualités peuvent permettre d'être informés des conférences et Webinaires prévus et d'accéder au contenu des présentations pour sélectionner les conférences auxquelles assister en fonction du PPC étudié.

L'**avantage** de ces présentations est qu'elles ciblent un **public averti** et donnent en général des **détails sur le projet qui a été mené et les résultats obtenus**. Les résultats présentés peuvent être quantitatifs, mais également qualitatifs ce qui contribue à l'objectif d'évaluation de la performance globale.

Deux **inconvenients** existent. Le premier, comme évoqué, est que **les entreprises qui communiquent sont souvent celles qui ont réussi**. Le 2^{ème} est que même si les résultats sont probants, il est peu probable que les entreprises évoquent l'ensemble de leurs difficultés. Ainsi, on **perd une partie des informations relatives aux échecs complets ou relatifs**.

Le recueil de données se fait principalement par prise de notes en s'appuyant sur le Guide thématique élaboré. Les supports des présentations ou les vidéos peuvent parfois être récupérés pour fiabiliser les données et corroborer la prise de note.

Les interviews d'experts

La réalisation du guide permet de réaliser des entretiens semi-directifs avec différents profils de personnes. En tant qu'experts ou utilisateurs, leur expérience est souvent bien plus riche que des exemples qui peuvent être donnés dans des publications. Des échanges éclairés par la phase P0 et le Guide méthodologique permettent de faire émerger les points positifs ou négatifs qu'ils considèrent comme essentiels.

Contrairement aux études documentaires, **les entretiens semi-guidés génèrent une interaction entre le chercheur et l'expert**. Cette interaction est essentielle, car elle permet au chercheur de réagir en fonction des réactions et des propos de l'interviewé. Il peut ouvrir de nouvelles réflexions, rebondir sur ses propos, lui demander de détailler ou argumenter ses réponses... Cette source est **riche et cruciale** dans la méthodologie retenue pour P1.

Afin de maximiser les résultats potentiels, nous considérons plusieurs profils d'experts à intégrer dans les interviews:

- **Les consultants experts de la méthode** : ils ont participé à plusieurs projets chez différents clients. Ils apportent une vision technique de la phase projet (thématique Tactique) et de la phase utilisation (Thématique Opérationnelle). Ils ont une vision extérieure à leur client et peuvent donner une vision plus objective que les clients eux-mêmes.
- **Les experts d'entreprises** : ceux qui sont des personnes impliquées dans le déploiement du PPC au sein d'une entreprise. Ils ne sont généralement pas des utilisateurs, mais plutôt des formateurs ou conseillers internes. Ils sont intégrés dans l'équipe projet ou au service support de PPC.
- **Les utilisateurs experts** : ce sont les personnes qui utilisent le PPC dans leurs fonctions ce qui inclut des planificateurs.
- **Les experts PPC n'utilisant pas le PPC étudié**. Il peut être intéressant d'obtenir l'avis de personnes expertes du domaine des PPC pour comprendre leur point de vue voire leur réticence. Cela contribue à l'enrichissement de l'analyse en remettant en perspective l'ensemble des arguments (favorables

ou défavorables). Charge à l'analyste de faire la part des choses en séparant les arguments fondés, s'ils existent, des craintes émanant d'un manque de connaissance sur le PPC.

La sélection des interviewés doit regrouper plusieurs personnes de chaque profil afin d'offrir une diversité de points de vue. S'agissant d'une étude exploratoire, leur nombre doit être suffisant (3 à 5 personnes par profil) pour apporter cette diversité sans être trop élevé. En effet, l'interview semi-guidée est une méthode de recueil et d'analyse de données chronophage, la multiplication des interviews n'apporte pas toujours de valeur ajoutée.

Le choix des personnes se fait essentiellement par contact direct ou via les réseaux professionnels. Pour les 3 premiers profils, chaque personne sélectionnée doit avoir une expérience avérée dans l'implantation et/ou l'utilisation du PPC étudié. Le travail effectué dans le cadre des conférences professionnelles ou dans le repérage des entreprises ayant déjà utilisé la méthode est crucial. Il permet d'identifier les personnes impliquées correspondant aux profils recherchés et facilite la prise de contact.

Le recueil des informations se fait par prise de note, le guide thématique servant de base aux échanges. Les notes recueillies sont mises en forme et soumises aux interlocuteurs pour validation. De plus, nous avons également conçu un outil de synthèse des interviews reprenant les réponses en fonction des thématiques ce qui simplifie leur exploitation. Un exemple est disponible en Annexe 2 .

Les visites sur site

L'objectif est d'examiner le fonctionnement du PPC sur site industriel et d'échanger en direct avec les utilisateurs voire d'obtenir des démonstrations à différents niveaux d'utilisations. Les visites sur site permettent au chercheur de voir le PPC en fonctionnement réel. Cette source d'information lui permet de constater par lui-même le fonctionnement en éliminant l'interprétation de tiers qui peut survenir lors des entretiens. Il permet également d'étudier les outils utilisés concrètement sur le terrain.

Comme pour les interviews, la sélection présente les mêmes caractéristiques. Il faut choisir un nombre restreint de sites industriels utilisant le PPC étudié avec une certaine expérience. Les projets en phase de démarrage, bien qu'intéressant, n'apportent pas d'information avant que le retour d'expérience n'ait été effectué.

Le choix des sites se fait via les mêmes réseaux professionnels que pour les interviews. Ces dernières peuvent être l'occasion de solliciter une visite sur site. Cette option permet d'obtenir la vision de l'expert via l'interview et d'étudier in situ le PPC. Les échanges sur place améliorent la compréhension du chercheur et peuvent faire apparaître de nouveaux résultats notamment en ce qui concerne les aspects organisationnels et humains.

La visite doit inclure des échanges avec différentes personnes directement impliquées dans l'utilisation du PPC (planificateur, ouvriers par exemple). La visite de l'atelier est indispensable sans quoi la valeur ajoutée de la visite par rapport à des interviews est réduite. Elle permet d'étudier plus précisément 2 dimensions du PPC :

- **La dimension Contrôle** : c'est celle qui nous semble la plus difficile à étudier en dehors d'une visite. En effet, dans les publications et conférences portant sur les PPC, ce sont souvent la planification et les résultats obtenus qui sont évoqués, rarement l'utilisation concrète dans l'atelier. Lors d'une visite, les échanges avec des ouvriers ou encore des responsables de production ou des chefs d'équipes qui utilisent concrètement le PPC sont indispensables. Leur avis sur l'utilisation est précieux notamment sur les aspects pratiques.
- **La dimension Outils** : s'ils peuvent être décrits dans certaines publications, leur fonctionnement précis ou les enjeux liés à leur utilisation sont rarement présentés. Les voir en fonctionnement et pouvoir poser des questions aux utilisateurs contribuent à l'évaluation qualitative.

Le recueil d'information se fait, là encore par prise de notes. Idéalement, des photos peuvent être prises sur place, mais la plupart des entreprises sont opposées à cette pratique.

Le principal biais se situe dans la sélection des sites qui peuvent ne représenter qu'une partie des utilisateurs. Enfin, le chercheur peut également être la source de biais d'interprétation par méconnaissance de l'organisation interne du site industriel visité.

Pour la synthèse de chaque visite, nous avons utilisé la trame développée pour les entretiens dont un exemple est visible en

Au total, nous avons identifié 7 types de sources qui peuvent être mobilisées dans P1-étude qualitative. Nous avons également établi un Guide thématique qui regroupe les points auxquels cette phase doit apporter des réponses. Chacune des sources contribue plus ou moins aux thématiques. Nous avons donc établi une grille permettant d'identifier la contribution potentielle de chaque type de source aux différentes thématiques.

IV-3 Proposition d'une grille « thématiques PPC par sources »

Le [Tableau IV-2](#) recoupe les informations recherchées et le type de source. La contribution attendue de chaque type de source aux thématiques est évaluée à travers un système à 4 niveaux (vide : pas contributif, faible contribution +, contribution moyenne ++, contribution forte +++)

Tableau IV-2 Grille thématiques PPC par sources

Niveau	Thématique	Sources internes			Sources Externes Documentaires		Sources Externes Terrain	
		Résultats Issus de P2-étude quantitative	Résultats Issus de P0-caractérisation	Publications Académiques sur cas réels	Conférences des Industriels	Publications promoteurs du PPC	Interviews Experts	Visites sur sites
stratégique	TS1- Justification de l'adoption du PPC		+	+	++	+	+++	++
	TS2- Caractéristiques de l'entreprise	++	++	+	++	++	+++	+++
	TS3- Organisation industrielle de l'entreprise	++	++	+	++	+	+++	+++
	TS4- Projets de développement futur					++	++	+++
Tactique	TT1 - Le périmètre du projet			+	+	+	++	+++
	TT2- L'accompagnement et formation		+				+++	++
	TT3- La durée du projet			+	+	+	++	++
	TT4- Les outils			+	+	+	+++	+++
	TT5- REX sur la phase projet			+	+	+	+++	+++
opérationnel	TO1- L'utilisation concrète du PPC		+			+	+++	+++
	TO2- Les outils utilisés		+	+		+	+++	+++
	TO3- Les résultats quantitatifs	+++	+	++	++	+++	+++	+++
	TO4- Les résultats qualitatifs		+	+	++	++	+++	+++

Le [Tableau IV-2](#) met en évidence la **forte contribution des sources terrain** à l'alimentation des thématiques. Au sein de ce type de sources, on distingue les interviews et les visites. Cependant, on ne peut pas se contenter de ce type de sources pour plusieurs raisons :

- **Taille de l'échantillon** : Que ce soit pour les interviews ou pour les visites, la méthode est chronophage ce qui ne permet pas d'avoir un échantillon suffisamment large pour pouvoir tirer des conclusions généralisables même dans le cadre d'une Étude qualitative.
- **Représentativité de l'échantillon** : étant donné la taille restreinte de l'échantillon, il est peu probable d'obtenir une représentativité de l'industrie française

De plus, il existe **plusieurs biais** :

- Du point de vue des interviewés
 - o Ils peuvent ne pas vouloir exprimer la totalité de leur point de vue, pour diverses raisons (conflit d'intérêts, peur pour l'image de l'entreprise, pour son image personnelle).
 - o Les interviewés peuvent tenter d'orienter leur réponse pour « plaire » à l'intervieweur, dire ce qu'ils pensent être attendu d'eux.
- Du point de vue de l'intervieweur :
 - o Le choix des personnes interviewées peut influencer les résultats : niveau du poste, profil personnel, profil de l'entreprise.
 - o Son point de vue n'est pas toujours neutre, les questions pouvant être orientées consciemment ou non.
 - o Il peut omettre certains points par manque de connaissance.

Le cadre méthodologique intègre notamment des interfaces entre les phases qui permettent un enrichissement mutuel. Concernant P1, comme indiqué par [Tableau IV-2](#), la contribution des sources issues des interfaces ne permet pas de couvrir l'ensemble des thématiques. Elles n'en sont pas moins indispensables car elles permettent le croisement des résultats et la réalisation des itérations. Nous choisissons donc de **croiser les sources terrain avec les sources diverses** comme les sources documentaires et les résultats issus des autres phases du cadre méthodologique.

Les sources Documentaires sont nombreuses, faciles d'accès et leur traitement est plus simple que celui des sources Terrain. Elles viennent donc les compléter, mais elles aussi comportent des limites :

- D'un point de vue macroscopique, une étude de documents professionnels (entreprises ou promoteur de la méthode) apporte des informations transmises par leurs émetteurs qui contrôlent leur communication et qui souhaitent, en général, mettre en avant leur succès. Cela représente un biais important pour une analyse objective de la performance des PPC. Il est peu probable de trouver des informations concernant les difficultés rencontrées et les remédiations qui ont été utilisées.
- Les publications académiques quant à elles, ne souffrent pas de ce biais et sont logiquement plus objectives. Il existe cependant 2 autres biais :
 - o Le 1^{er} concerne le nombre de publications : il y a souvent un décalage temporel entre l'utilisation concrète de nouveaux concepts dans l'industrie, et leur étude par les chercheurs. Si l'on souhaite étudier un PPC émergent, les publications ne sont pas pléthoriques et les résultats sont à relativiser par manque de références.
 - o Le 2^{ème} biais concerne le sujet précis de ces études portant sur les PPC. Elles n'entrent pas nécessairement dans le champ de l'évaluation des performances et si c'est le cas, toutes ne traitent pas d'implantation réelle. Là encore, le nombre de cas peut être problématique pour la représentativité des résultats.

Compte tenu des biais multiples et inhérents à chaque type de sources, il nous semble essentiel, d'une part, de multiplier les études de cas et, d'autre part, de recouper les informations sur les cas étudiés pour valider les informations. **Ce sont donc les 7 types de sources qui doivent être exploités afin d'obtenir des résultats fiables.**

Compte tenu de la diversité et du nombre de sources, nous proposons, en tant que résultat intermédiaire de P1-étude qualitative, la création d'une base de données recensant les cas réels et leurs résultats. Le traitement des informations ainsi recensées alimente les différents livrables du rapport d'analyse ainsi que les interfaces. Ces contributions seront donc également détaillées dans le paragraphe suivant.

IV-4 Les résultats de la phase P1-étude qualitative

P1 a pour but d'élargir la vision acquise lors de P0 en intégrant une vision pragmatique du PPC dans ces 3 phases (choix, implantation et utilisation). L'utilisation conjointe des 7 types de sources, permet de corroborer les résultats.

Cette phase donne lieu à 2 types de résultats : une base de données des cas industriels et l'enrichissement des livrables du rapport d'analyse. Nous présentons ici d'abord la synthèse des cas industriels puis les contributions aux livrables du rapport d'analyse.

IV-4.1 Base de données pour la synthèse des cas industriels

Les sources étant multiples, il est indispensable de créer un outil permettant la synthèse des cas et leur exploitation. Nous avons opté pour une base de données comportant, pour chaque cas, plusieurs informations regroupées par thème

- **Présentation entreprise :**
 - o Nom
 - o Pays : utilisation des codes internationaux
 - o Taille : basé sur la typologie de l'INSEE (TPE<10 salariés, PME<50 salariés, ETI 250 à 4999, grande entreprise >5000)
 - o Activité : activité précise de l'entreprise
 - o Secteur : macro secteur industriel
- **Organisation industrielle de l'entreprise :**
 - o Mode de réponse à la demande MTS, MTO, ATO, ETO
 - o Processus : discret ou continu
 - o Périmètre d'utilisation : fonctions incluses dans le processus PPC : approvisionnement, production ou distribution
- **Évocation du cas :**
 - o Type de sources :
 - Documentaire : Promoteur de la méthode, Académique ou industriels
 - Étude terrain : visite et/ou interview
- **Résultats :**
 - o Quantitatifs attendus : selon les 3 axes de la performance choisis : client, industrielle et financière.
 - o Autres résultats quantitatifs : il s'agit de répertorier les impacts du PPC sur d'autres indicateurs non identifiés en amont. Il peut s'agir d'amélioration ou de dégradation de la performance non anticipée
 - o Qualitatifs attendus : certains PPC mettent en avant des bénéfices organisationnels ou managériaux.
 - o Qualitatifs autres : ce sont des effets positifs ou négatifs autres que ceux annoncés
- **Remarques :** cette catégorie est destinée à recevoir des informations complémentaires telles que des précisions apportées dans le cas, des recommandations, des informations sur les outils....

Cette base est alimentée au fil de P1 et regroupe l'ensemble des cas réels d'implantation Son enrichissement se fait grâce aux relevés faits lors de l'analyse des différentes sources. **Une attention particulière doit être portée à la systématisation des mots clés lors de la recherche et ainsi qu'aux indicateurs présentés.** Ces derniers ne sont pas standardisés, dès lors il convient de les traduire dans le format attendu dans la base de données.

Chaque cas ne donne lieu qu'à un seul enregistrement dans la base de données, on indique les différentes sources utilisées s'il est évoqué plusieurs fois... Si certains éléments divergent entre les différentes versions, la précision sera apportée dans la colonne correspondante dans les remarques.

Certains d'entre eux font l'objet d'une étude approfondie, car ils intègrent les sources terrain (Interviews et/ou visites). Leur valeur ajoutée est considérée comme importante, car les interactions auront permis d'apporter toutes les précisions nécessaires. La précision sera également apportée.

Ce tableau de synthèse permet tout d'abord d'effectuer des statistiques sur des éléments qualitatifs et de tirer des conclusions quant à :

- L'existence d'un profil type d'entreprise se dégage-t-elle ? Le PPC paraît-il plus adapté à un contexte industriel qu'à un autre ?
- L'existence d'organisations industrielles plus ou moins adaptées
- Aux niveaux atteints de performance quantitative. Sont-ils cohérents avec ce qui est annoncé par le PPC ?

Il permet également de regrouper :

- Les indicateurs quantitatifs autres que les 6 retenus pour exprimer la performance des PPC dans le cadre méthodologique,
- Les performances qualitatives,
- Les conseils émis suite à la mise en place et à l'utilisation du PPC,
- Les autres points remarquables.

Ce regroupement des idées fortes, au sein d'une base de données, facilite leur traitement et l'intégration des résultats aux livrables.

Cette synthèse des cas remonte une quantité importante de données issues de toutes les sources, mais ne contient pas tous les résultats issus de P1. Elle alimente également directement les livrables du rapport d'analyse. Nous présentons d'abord une vision globale des contributions que nous détaillerons dans un second temps.

IV-4.2 Contributions aux livrables du rapport d'analyse

Le [Tableau IV-3](#) fait état des contributions attendues des thématiques étudiées dans P1 aux 6 livrables (hors D0).

Tableau IV-3 Liens thématiques de P1-étude qualitative vs livrables

Niveau	Thématique	D1 Périmètre décisionnel PPC	D2 Grille d'Analyse des Caractéristiques Générales	D3 Synthèse des Éléments Constitutifs	D4 Grille d'Analyse des indicateurs	D5 Synthèse Bénéfices/Risques	D6 Conclusion et recommandations
stratégique	TS1- Justification de l'adoption du PPC					+++	+++
	TS2- Caractéristiques de l'entreprise		+++				+++
	TS3- Organisation industrielle de l'entreprise		+++			+++	+++
	TS4- Projets de développement futur						
Tactique	TT1 - Le périmètre du projet	+	+++			+++	
	TT2- L'accompagnement et formation					+++	+++
	TT3- La durée du projet					+++	
	TT4- Les outils					+++	+++
	TT5- REX sur la phase projet					+++	+++
opérationnel	TO1- L'utilisation concrète du PPC			+++		++	+++
	TO2- Les outils utilisés			+++		++	+++
	TO3- Les résultats quantitatifs			+++	+++		+++
	TO4- Les résultats qualitatifs			+++		+++	+++

Chaque thématique contribue à l'enrichissement de différents livrables. Comme on peut le constater, les livrables 5 (Synthèse Bénéfices/Risques) et 6 (Conclusion et Recommandation) sont les plus impactés.

Rappelons que dans le cadre méthodologique proposé, chaque phase est susceptible de modifier ou d'enrichir les livrables. La traçabilité des résultats est assurée grâce aux codes mentionnant la phase ayant contribué au résultat et le type de résultat (Additionnel, Corroborant ou Divergent).

Le détail des contributions potentielles de P1 aux livrables est décrit dans les points suivants :

- **D1 Périmètre décisionnel** : P1-étude qualitative permet la validation du périmètre en vérifiant l'ampleur des projets terrain et l'utilisation concrète des différents processus proposés.
- **D2 Grille d'Analyse des Caractéristiques Générales du PPC** : P1 contribue à l'amélioration de la Grille d'Analyse établie grâce à la phase de caractérisation. Elle permet d'affiner les différents éléments voire de les remettre en cause si les retours d'expériences montrent une réelle différence entre les éléments avancés par la théorie du PPC et la réalité terrain.
- **D3 Paramètres pouvant influencer la performance** : grâce aux échanges avec les experts et les utilisateurs, les rôles des différents paramètres du PPC pourront être précisés. L'un des objectifs est d'identifier ceux qui ont, d'après la pratique, une influence forte sur les résultats obtenus.
- **D4 Grille d'Analyse des indicateurs** : Objectivation de la performance annoncée : ce sont les résultats relevés au sein de la Synthèse des Cas qui permettront de remplir la partie Performance Industrielle de ce livrable et d'établir le comparatif entre la performance annoncée et la performance obtenue dans des cas d'implantation réels.
- **D5 Analyse bénéfiques/risques** : ce livrable est essentiellement réalisé à partir de P1. Les éléments peuvent être issus de toutes les sources exploitées dans cette phase.
- **D6 : Conclusions et recommandations** : les échanges et analyses effectuées au sein de P1 permettent la confrontation entre la théorie et la pratique. Elle peut faire ressortir les points saillants et les recommandations faites par les praticiens et les experts.

IV-4.3 Contribution aux entrées de P2-étude quantitative via interface P1 ► P2

Le cadre méthodologique est conçu pour favoriser les échanges entre les Études Qualitative et Quantitative. Les analyses des thématiques de P1 doivent mettre en évidence :

- Les paramètres propres aux PPC susceptibles d'influencer la performance.
- Les caractéristiques de l'organisation et du contexte industriel pouvant être plus ou moins favorables à l'utilisation du PPC.
- Des comportements non explicités par la théorie du PPC

Ces paramètres identifiés doivent permettre de construire des plans d'expériences ou des Preuves de Concept (POC) qui seront ensuite réalisés lors de P2. Dès lors, ils seront transférés au fur et à mesure dans la partie Interfaces des itérations au sein des livrables concernés :

- D2 Grille d'Analyse des Caractéristiques, pour les paramètres de l'organisation et du contexte industriel.
- D3 Éléments constitutifs pour les comportements du PPC.

Conclusion

P1 a été présentée dans le détail ce qui inclut ses objectifs, ses composantes et ses outils. Son rôle majeur au sein du cadre méthodologique est d'apporter une vision pragmatique du PPC et de confronter la vision théorique issue de P0 à la réalité des entreprises utilisatrices. Elle doit également contribuer la corroboration des résultats issus de P2.

Nous nous sommes appuyés sur la constitution d'un Guide thématique servant de base à l'ensemble des investigations menées dans cette phase. Ce guide comprend les thématiques identifiées comme communes à l'ensemble des PPC mais la méthodologie proposée inclut la possibilité de l'enrichir en fonction des besoins si l'étude d'un PPC le nécessite.

L'approche proposée combine différents types de sources documentaires mais également des sources dites Terrain (Conférence, visites sur site et interviews) ce qui permet un croisement et un enrichissement des résultats obtenus. Le traitement de l'ensemble des sources permet, in fine, de constituer une base de données recensant les cas réels d'implantation et d'alimenter les livrables.

Elle transmet par ailleurs à P2 des hypothèses qui demandent à être testées dans des plans d'expériences. Inversement les plans d'expériences peuvent faire émerger des comportements inattendus du PPC qui demandent à être validés par la pratique. Le chapitre suivant qui détaille la phase P2 doit être effectuée en parallèle de P1 pour permettre les interactions et donc l'enrichissement des résultats.

Chapitre V

Étude quantitative

<u>V-1</u>	<u>UNE VISION SYSTÉMIQUE COMME CADRE DE MODÉLISATION</u>	101
	V-1.1 Les PPC pilotes des systèmes productifs comme objet d'étude	101
	V-1.2 Vision générale du modèle	102
	V-1.3 Le cadre expérimental	108
<u>V-2</u>	<u>LE SIMULATEUR</u>	109
	V-2.1 Recours à la simulation à événements discrets (DES)	109
	V-2.2 Architecture générale du simulateur	110
	V-2.3 Le système de gestion de base de données : cœur du PPC	111
	V-2.4 Le simulateur à événements discrets comme joueur	114
<u>V-3</u>	<u>INTÉGRATION DU MODÈLE DE SIMULATION DANS LE CADRE MÉTHODOLOGIQUE</u>	117
	V-3.1 Les entrées	118
	V-3.2 Les sorties	119
	<u>CONCLUSION</u>	121

RÉSUMÉ

Le cadre méthodologique proposé pour l'évaluation globale des PPC s'appuie sur 3 phases : une phase préalable de caractérisation du PPC, une étude qualitative et une étude quantitative. Les 2 premières ont été présentées en détail respectivement dans les chapitres 3 et 4. La 3^{ème} phase du cadre consiste en une étude quantitative et a pour but d'évaluer la performance quantitative d'un PPC en contexte stochastique. Les PPC sont considérés comme le moteur du système productif qui permet de planifier et exécuter la production et donc de répondre à la demande client. L'enjeu de l'évaluation est de savoir si le PPC permet ou non d'assurer la performance en fonction de différents facteurs comme les paramètres internes du PPC et externes, c'est-à-dire représentatifs du contexte industriel.

Cette étude quantitative repose sur une approche simulateur. Dans ce chapitre, nous détaillerons l'approche globale du modèle de simulation proposé. Il se compose d'une partie modélisation basée sur la vision systémique présentée dans la partie I et d'un simulateur s'appuyant sur la simulation à événements discrets présentée dans la partie II. Nous concluons sur l'intégration de l'étude quantitative au sein du cadre méthodologique.

Au sein de notre cadre méthodologique, le rôle de la phase P2-étude quantitative est double :

- Elle a pour but principal d'évaluer la dimension quantitative de la performance du PPC. Dans ce cadre, l'objectif est de comprendre les ressorts de la performance soit en testant et validant l'existence d'impact de paramètres internes et externes sur la performance (expérimentation in vitro), soit en comparant la performance du PPC proposé par rapport à une situation existante (expérimentation in vivo).
- Elle doit également contribuer à améliorer la compréhension du fonctionnement du PPC. Le modèle proposé devra permettre d'effectuer des Preuves de Concept (POC) pour confirmer ou infirmer des comportements du PPC constatés lors des phases P0-Caractérisation ou P1-étude qualitative.

Cette étude quantitative s'appuie sur la réalisation de plan d'expériences qui sont construits en fonction des paramètres issus soit P0 soit de la phase P1. Comme explicité aux Chapitres 3 et 4, les résultats ou interrogations issus d'une phase et nécessitant une validation par une autre phase du cadre méthodologique sont inscrites dans la partie Interface de chaque itération des livrables. Ainsi, pour chaque thème PPC, nous obtenons une « liste » de points à éclaircir dont certains servent de base à la construction de plans d'expériences déployés au sein de P2. Les plans ainsi réalisés permettent de confirmer ou infirmer des hypothèses quant à la performance quantitative du PPC étudié en utilisant des expériences in vitro et in vivo.

Compte tenu des objectifs et des méthodes explorées au Chapitre II, État de l'art, la modélisation simulation est l'approche qui a été retenue pour la phase P2. Elle permet, en effet, de mener des plans d'expériences sur des systèmes complexes. P2 nécessite, par conséquent, la construction d'un modèle de simulation. Le cadre méthodologique se veut adaptable en fonction des objectifs d'évaluation de la performance, du niveau de connaissances et de diffusion du PPC étudié. Le **caractère adaptable** du cadre réside, non seulement, dans le choix des phases à utiliser mais également dans la proposition d'un **modèle paramétrable** permettant la mise en œuvre de plans d'expériences in vitro et in vivo et capable d'évaluer la performance de différents PPC dans différents contextes industriels sans remettre en cause la structure du modèle.

Des définitions ou propositions méthodologiques de modélisation très abouties existent (Balci, 2012), cependant l'objectif de ce travail n'est pas de contribuer directement au champ de la théorie de la modélisation et simulation. Nous ne détaillerons donc pas ces méthodes et optons pour une approche, basée sur les travaux de (Zeigler et al., 2019), qui permet une présentation simple des éléments du modèle. D'après les auteurs, tout modèle de simulation s'appuie sur 4 composants et leurs relations.

- Le système réel est celui qui nous souhaitons représenter afin de l'étudier
- Le cadre expérimental fixe le cadre et les objectifs des plans d'expériences, i.e. ce pourquoi la simulation est utilisée, le modèle doit être construit pour répondre à ces questions et ne peut pas être une représentation complète du système réel. Il fixe également les indicateurs qui permettront d'évaluer la performance au regard des objectifs fixés
- Le modèle est « l'ensemble d'instructions, de règles, d'équations ou de contraintes pour transformer les entrées en sorties » (Zeigler et al., 2019). Il doit permettre de décrire les comportements attendus. À travers cette définition, les auteurs écartent la dimension universelle du mot « Modèle » en se focalisant sur les aspects techniques.
- Le simulateur est vu « comme n'importe quel système de calcul (tel qu'un processeur unique, un réseau de processeurs, l'esprit humain, ou plus abstraitement un algorithme), capable d'exécuter un modèle pour générer son comportement. »

La relation de modélisation entre le modèle et le système réel renvoie à la notion de validation tandis que celle entre le modèle et le simulateur renvoie à la vérification. D'après (Sargent, 2010), ces étapes de validation et de vérification du modèle assurent la validité des résultats.

La Figure V-1 Le modèle de simulation adapté de Zeigler et al., 2019 présente la vision de (Zeigler et al., 2019) en 4 composants. Elle nous semble pertinente pour décrire le modèle de simulation que nous proposons dans le cadre de l'évaluation de la performance des PPC. Il nous permettra de présenter les différents composants en apportant pour chacun les principaux éléments et caractéristiques à intégrer. Nous nous

appuyons sur cette proposition en regroupant les composants en 2 grands ensembles : la partie Modélisation et la partie Simulateur telles que représentées dans le schéma suivant

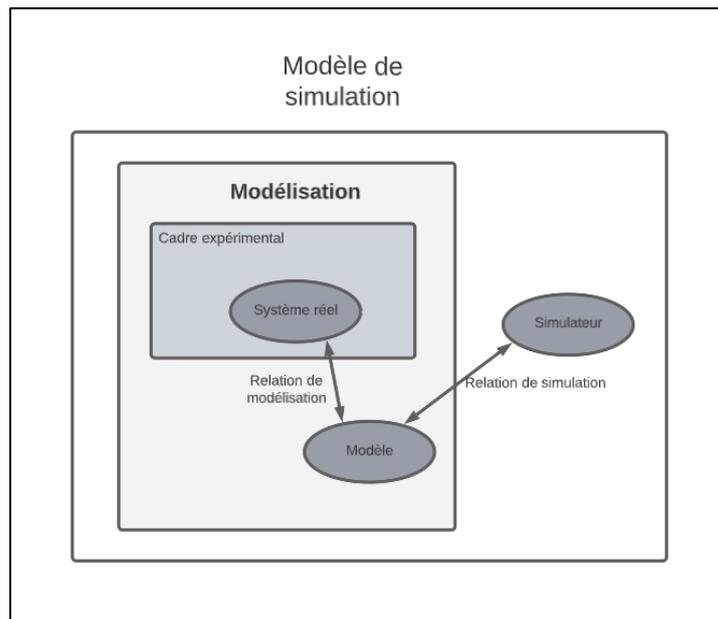


Figure V-1 Le modèle de simulation adapté de Zeigler et al., 2019

Ce chapitre a pour objectif de présenter le modèle de simulation et la méthodologie proposée dans le cadre de P2. Nous présenterons, en premier lieu, le modèle et ses différents composants puis le simulateur et son fonctionnement et enfin l'intégration au sein du cadre méthodologique proposé.

V-1 Une vision systémique comme cadre de modélisation

Dans la définition retenue de (Zeigler et al., 2019) présentée dans la Figure V-1, la partie modélisation comporte 3 éléments indissociables : le système réel, objet de l'étude, le modèle qui en est sa représentation et le cadre expérimental qui définit le cadre et les objectifs. Chacun d'eux est détaillé dans les paragraphes suivants.

V-1.1 Les PPC pilotes des systèmes productifs comme objet d'étude

Nous souhaitons évaluer globalement la performance des PPC qui ont pour but de planifier et contrôler la production et les approvisionnements en vue de satisfaire les besoins des clients. **L'objet de l'étude, ou système réel à modéliser**, est donc celui des systèmes productifs et de leur système de pilotage, les PPC. Le 0 a permis de définir globalement le champ de l'étude, il s'agit ici de préciser le périmètre retenu dans le cadre de la modélisation.

La notion de périmètre renvoie ici à 2 aspects. Le premier est celui du système réel que le modèle représente et le second celui du champ du PPC que nous souhaitons étudier.

Concernant le premier aspect du périmètre, i.e. celui du système productif modélisé, le Chapitre 3 a montré l'importance de la prise en compte du contexte industriel dans cette évaluation. Cette intégration nécessite un modèle de simulation capable d'étudier différents contextes et par conséquent différents systèmes industriels. Dès lors, notre objet d'étude ne se limite pas à un seul système productif, mais à une famille de systèmes productifs qu'il convient de définir.

L'objet de notre étude se focalise sur le système productif intégrant les sous-systèmes physiques (Production, livraison), d'information et de pilotage (PPC). Nous ne considérons pas les implications des autres sous-systèmes (commercial, logistique...) dans la performance. Par conséquent, l'objet de l'étude se limitera à un système de production interne à une entreprise, les interfaces avec les clients et les fournisseurs sont

réduites à l'expression de la demande et aux livraisons depuis l'amont (les fournisseurs) et vers l'aval (les clients). Du point de vue du fournisseur, nous ne tenons pas compte des contraintes de capacité et les considérons comme capacitaires.

La [Figure V-2](#) suivante explicite le périmètre du système industriel retenu.

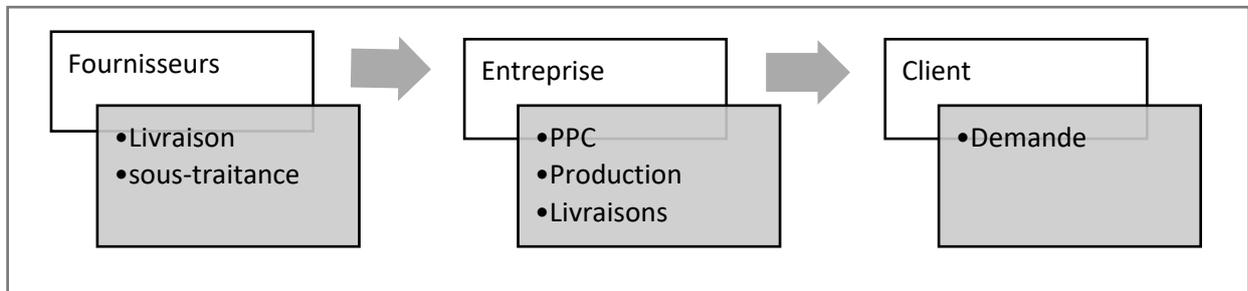


Figure V-2 Représentation du périmètre retenu pour l'étude simulateur

Il s'agit d'une Supply Chain (SC) linéaire à 2 échelons centrée sur l'entreprise étudiée applicable à un ensemble de systèmes industriels. Les interactions avec les tiers étant limitées aux processus de commandes et de livraisons, nous n'intégrons pas les problématiques liées à la coopération et au partage d'information dans le cadre des Supply Chains. Si la vision Supply Chain est très simplifiée, nous conservons dans notre approche l'imbrication des maillons générant des contraintes sur le système productif de l'entreprise. La variabilité est intégrée entre chaque maillon afin de les représenter.

Concernant le second aspect, c'est-à-dire le périmètre du système de pilotage (le PPC), il sera calqué sur celui du PPC tel que défini dans le [III-1.1-Étude du périmètre fonctionnel](#): nous nous concentrons sur l'évaluation de la partie Processus Récurrents (cf. [Figure III-4 page 59](#)). **Parmi ces processus récurrents, la partie Contrôle des PPC comporte, des dimensions Suivi des Ordres et des Ressources.** Ces 2 éléments correspondent au **pilotage réactif** du PPC : en cas de dérive, dans la réalité industrielle, des décisions sont prises en réaction aux dysfonctionnements constatés. **Celles-ci ne seront pas intégrées.** En effet, la simulation à événements discrets ne permet pas de reproduire ce type de décisions qui entrent, le plus souvent, dans le champ des décisions non reproductibles et donc difficilement modélisables. L'objet de l'étude se focalisera par conséquent sur la performance autonome du PPC c'est-à-dire en dehors des actions correctives, liées au suivi des ordres et des ressources, qui sont techniquement difficilement intégrables dans un modèle de simulation.

Le modèle utilisé pour P2 comprend l'ensemble des 7 autres processus récurrents. L'ensemble des tâches et sous-processus alloués qui y sont évoqués doivent être intégrés dans le modèle. Le modèle doit être capable de reproduire ces processus qui conduisent à la définition des ordres de fabrication et d'approvisionnement.

Rappelons que tous les PPC n'ont pas un périmètre englobant l'ensemble de ces 7 processus récurrents. Dans notre cadre méthodologique, le périmètre exact est identifié lors de la phase de caractérisation et affiné lors de P1. En l'absence de préconisations claires du PPC étudié pour un ou plusieurs processus, des règles de base devront donc être définies dans le modèle pour chacun d'entre eux. Celles-ci seront définies à partir de la pratique « la plus courante » dans le monde industriel (par exemple FIFO pour l'ordonnancement).

V-1.2 Vision générale du modèle

La logique du cadre méthodologique, présentée au [Chapitre II](#), s'appuie sur la vision systémique proposée par [\(Reix et al., 2016\)](#) comprenant 3 sous-systèmes : opérant, information, décision (ou Modèle O-I-D). Cette vision nous a conduits à considérer le système productif d'une entreprise industrielle comme un ensemble de 3 sous-systèmes : le système physique (ou Opérant), le système d'information et le système de pilotage ou PPC (Décision).

En intégrant cette vision systémique au périmètre industriel considéré (Supply Chain linéaire à 2 échelons) ; le modèle général peut être résumé avec le schéma suivant qui représente, pour chaque niveau décisionnel, les différents macro processus exécutés par chacun des 3 maillons de la Supply Chain.

Comme indiqué dans la [Figure V-3](#), le modèle comprend 3 maillons, mais le **cœur du sujet d'étude est le système de production de l'entreprise** comprenant 3 sous-systèmes. Comme étudié dans le Chapitre 1, chacun possède un ensemble de processus complexes dont les caractéristiques doivent être prises en compte dans le modèle.

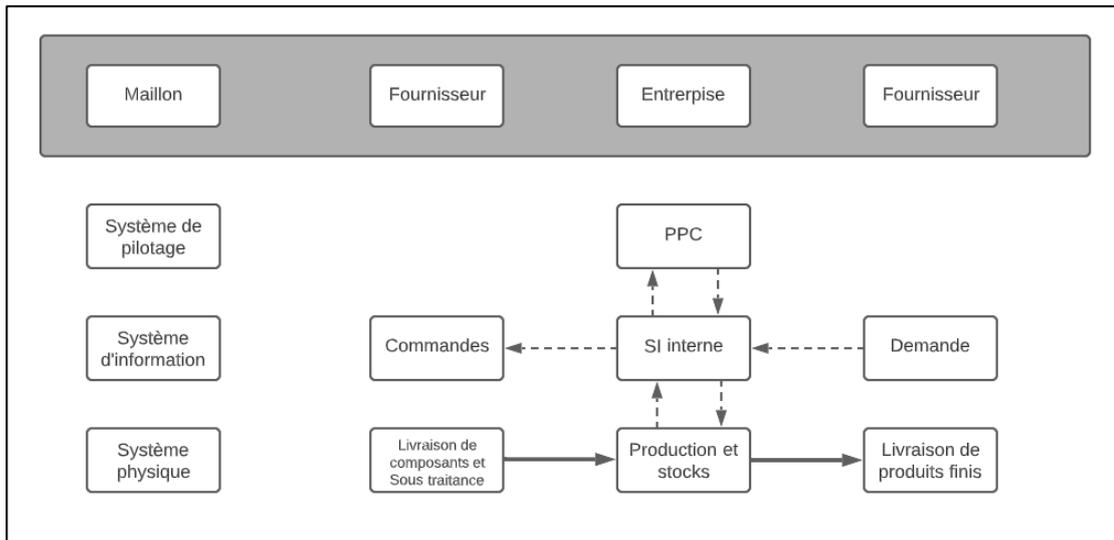


Figure V-3 Représentation systémique du modèle

Le système physique

Le système physique d'un système de production comprend classiquement 3 types d'éléments :

- L'ensemble des flux physiques internes et externes c'est-à-dire de produits, composants ou semi finis qui circulent dans l'entreprise et entre l'entreprise et ses fournisseurs ou clients.
- Les stocks de toute nature à l'exception des stocks d'outillage. Nous n'intégrons pas cette contrainte spécifique dans le modèle.
- Les ressources logistiques (matériels de transport, de stockage, personnel) et de fabrication (machines et personnel) utilisées par le système.

Dans le cadre de notre modèle, nous présentons une version centrée sur le PPC et son impact sur la performance industrielle. Nous souhaitons nous concentrer sur quelques facteurs alimentant la variabilité indépendamment des dimensions logistique et qualité. Certaines réalités industrielles sont donc simplifiées ou non intégrées telles que :

- **La dimension transport** : il n'est pas tenu compte des contraintes physiques et matériels liés aux transports internes et externes. Par contre, les aléas de livraison fournisseurs seront intégrés à travers une loi statistique s'appliquant aux délais. En ce qui concerne les transports interpostes, le modèle doit pouvoir intégrer des temps de transfert s'ils sont significatifs.
- **La dimension spatiale de l'atelier** : le cœur de l'étude étant le PPC, l'atelier est vu comme un moyen conceptuel de réalisation de la production et non une réalité physique dans laquelle l'implantation des ressources a une incidence sur la performance.
- **La dimension spatiale des stocks** : les stocks sont évalués en termes monétaires et de quantité, mais la surface occupée n'est pas intégrée dans le modèle ni en tant que contrainte ni en tant qu'indicateur de performance.
- La dimension **qualité de la production** : nous ne tiendrons pas compte du taux de rebut afin de pouvoir isoler facilement les causes des contreperformances et ainsi simplifier les analyses.
- La **maintenance et la fiabilité** de l'appareil productif : nous ne souhaitons pas analyser les causes des défaillances ni l'incidence de la maintenance. Les aléas seront gérés globalement par une loi statistique s'appliquant aux temps opératoires.

En conséquence, le sous-système physique intègre :

- **Les flux en provenance des fournisseurs** qui incluent les livraisons de composants et les opérations de sous-traitance. Les livraisons de composants sont déclenchées par l'émission d'ordre d'approvisionnement par le PPC. La sous-traitance fait référence à des opérations au sein de la gamme qui sont réalisées par des sous-traitants ce qui suppose que les produits en cours de fabrication sont envoyés chez un fournisseur avant d'être réintégrés dans l'entreprise. De ce fait, leur planification relève du lancement des ordres de fabrication et non de la génération d'ordres d'approvisionnement.
- **Les flux à destination des clients** : il s'agit des livraisons de produits finis. Elle a lieu à partir du délai demandé par le client sans possibilité de livrer en avance. Les produits finis sont ensuite expédiés dès qu'ils sont disponibles. La livraison doit avoir lieu dans le délai demandé par le client pour que le taux de service soit respecté. On comptabilise une commande comme dans les délais dès lors qu'elle est livrée sur la même période que celle demandée par le client (même journée, semaine ou mois en fonction de la périodicité de la demande).
- **La fabrication** elle-même est modélisée par un temps opératoire unitaire qui sera multiplié par la quantité de l'ordre de fabrication. Des temps de réglage peuvent être intégrés si besoin. Les temps opératoires sont gérés au niveau des gammes, les ressources gèrent individuellement les temps pour chaque OF.
- **Les transferts interpostes** s'ils sont significatifs sont modélisés par un temps indépendamment des matériels de manutention utilisés.
- **Les stocks** : le modèle comprend plusieurs types de stocks. Le 1^{er} est un stock commun de composants provenant soit des fournisseurs soit des opérations productives pour les semi-finis. Une fois terminés, les produits finis sont également stockés. Enfin, il existe des en-cours avant les postes de charge.

Concernant les ressources productives, nous les évoquons indépendamment de leur nature, il pourra s'agir d'opérateurs, de machines ou du couplage entre les 2. Étant donné l'objectif d'utilisation du même modèle pour les différents plans d'expériences, il doit être capable:

- De multiplier les ressources de même nature, on parlera de poste de charge pour évoquer un ensemble de ressources dédiées à la même opération.
- D'intégrer un nombre important de ressources pour représenter des organisations complexes. Le modèle embarque 100 postes de charge comprenant chacun jusqu'à 10 ressources identiques. L'ensemble de leur paramétrage est commun et la file d'attente partagée. Les files sont gérées en fonction du critère préconisé par le PPC. En l'absence de précision, c'est le critère FIFO qui s'applique.
- De modifier le nombre de ressources au sein des Postes de charges et le nombre de postes de charge ouverts en fonction de l'expérience menée.
- D'appliquer des calendriers d'ouverture différents sur chaque poste de charge.
- De gérer la répartition des OF au sein du poste de charge.
- De représenter les différents types d'organisation d'atelier : flowshop, jobshop ou cellule. Cependant, cette organisation sera conceptuelle, car notre modèle n'intègre pas l'implantation spatiale des ressources. Ce sont les gammes des produits qui définiront l'organisation : par exemple, en utilisant toujours la même séquence de poste de charge au sein de gammes, on crée un flowshop.

Nous ne considérons pas le cas des ressources communes, tel que celui d'un opérateur partagé entre plusieurs postes pour des opérations de réglages par exemple.

Le système physique du modèle représente l'exécution de la production. Dans le cadre du modèle OID, cette exécution est pilotée par le PPC qui est également intégré dans le modèle.

Le système de pilotage ou PPC

Le périmètre retenu pour le PPC, dans le cadre méthodologique proposé, a été largement discuté au chapitre 3 et au début de chapitre. Nous nous concentrons sur l'évaluation de la performance des processus

de planification récurrents du PPC. Le système de pilotage concerne uniquement les décisions qui s'organisent selon 3 niveaux.

Niveau stratégique

La définition du périmètre PPC implique que **les décisions stratégiques non récurrentes** relevant du PPC (organisation de l'atelier ou le mode de réponse à la demande) **sont fixes à l'échelle de la simulation**. Elles sont considérées comme **des données du contexte industriel**. Dans le cadre méthodologique proposé, nous souhaitons étudier l'impact du contexte industriel sur la performance du PPC.

Concernant les **décisions stratégiques récurrentes** i.e. la détermination d'un **plan de production global et des ressources globales** qui en découlent, le modèle les intègre si le PPC étudié les englobe. Dans le cas des PPC possédant ces processus comme MRP2, le processus sera automatisé pour les cas in vitro ce qui signifie que les ressources seront dimensionnées en fonction de la demande. Pour les cas in vivo, le choix doit être laissé entre une détermination automatique et un paramétrage issu de la situation réelle de l'entreprise.

Pour les autres niveaux de décisions du PPC, les décisions à retranscrire dans le modèle sont plus nombreuses.

Niveau tactique

Au niveau tactique : les 2 processus de décisions en jeu sont la détermination des **besoins détaillés par produit** et de la **capacité à moyen terme**. Les décisions de planification des besoins en produit découlent des paramétrages et du niveau des variables intégrées dans les calculs du PPC (ex : un niveau de stock pour un système à point de commande). Ces décisions portent sur

- **Les ordres de fabrication (OF)** : il s'agit de déterminer les quantités à fabriquer pour les produits finis et les semi-finis en fonction de la méthodologie préconisée par le PPC étudié.
- **Les ordres d'approvisionnement (OA)** : ce sont les quantités de composants à commander auprès des fournisseurs. La sous-traitance est considérée comme une opération de la gamme et non comme une commande fournisseurs, il n'y a donc pas de calcul des quantités dédié à la sous-traitance. Par ailleurs, les fournisseurs sont considérés comme capacitaires.

Pour certains PPC, gérés sur seuil (comme Kanban), les décisions de lancement des ordres relèvent du niveau opérationnel c'est-à-dire qu'il n'y a pas de planification des quantités à moyen terme.

Le 2nd processus tactique est la détermination des capacités à moyen terme. Elle peut être une donnée d'entrée ou bien être issue d'un calcul automatique relevant du paramètre taux de charge cible.

Niveau opérationnel

Au niveau opérationnel, là encore, on distingue les décisions de paramétrage et les décisions dynamiques. Pour les 1^{ères}, il s'agit de décider des règles à appliquer concernant :

- Le lancement effectif d'un Ordre dans l'atelier ou chez les fournisseurs. Ex pour un système Time Phased comme MRP2, la date de lancement est calculée en calculant la date demandée par le client moins le LT de planification. Dans le cas de Kanban, l'ordre est lancé dès que la consommation du stock conduit à un niveau critique et la quantité de l'ordre est prédéterminée par le dimensionnement du Kanban.
- Ordonnancement : si le PPC embarque un système de gestion de priorité des ordres, le modèle doit l'intégrer.
- Séquencement : le processus de séquencement n'est généralement pas géré de façon globale pour tout l'atelier, mais devra être pris en compte si nécessaire au niveau de certains postes.

Comme explicité plus haut, les processus de suivi et les actions correctives qui en découlent ne sont pas intégrés dans le modèle.

Le système de production, que nous venons de décrire, nécessite un système d'information qui permet les échanges entre le système physique et le système de pilotage i.e. le PPC. Dans le cadre du modèle, le système d'information comprend plusieurs caractéristiques.

Le système d'information

Le système d'information regroupe l'ensemble des informations ascendantes et descendantes entre le système physique et le PPC utilisées dans le modèle. Son périmètre sera lui aussi limité aux informations nécessaires compte tenu du périmètre décrit ci-dessus.

On distingue dans notre modèle 2 catégories d'information : (1) les informations statiques qui sont nécessaires au paramétrage du modèle et qui sont issues des choix stratégiques et tactiques évoqués plus haut et (2) les informations dynamiques qui évoluent au fil de la simulation et qui permettent la prise de décision.

Les informations statiques

Les informations statiques sont celles qui permettent de définir les caractéristiques du système productif pour chaque expérience à savoir :

- a) La structure de l'organisation industrielle :
- **Le nombre de cellules de production** : elles dépendront des gammes et doivent pouvoir être choisies ou déterminées automatiquement dans les cas in-vitro.
 - **Le nombre de ressources identiques dans la cellule** : le nombre de ressources au sein de la cellule sera défini cellule par cellule et non globalement pour faire écho à certaines organisations industrielles dans lesquelles chaque cellule dispose d'un nombre de ressources indépendamment des autres cellules. La file d'attente est commune à l'ensemble des ressources de la cellule et la répartition des ordres est faite selon la règle du plus faible taux d'occupation
 - **Les calendriers d'ouverture** et leur affectation aux cellules de production : le modèle doit permettre d'affecter différents calendriers d'ouverture si le besoin existe. Il définit le nombre d'heures disponibles sur la période
 - **Le taux de charge cible** : pour dimensionner le modèle dans les cas in vitro, un taux de charge cible sera intégré. Il permet de calculer le nombre de ressources par cellule nécessaire en fonction de la demande moyenne
 - **L'horizon ferme** : l'horizon ferme doit pouvoir être modifié. Il s'agit de définir à quel moment l'entreprise dispose de l'information de la demande réelle. Cette information conduit à figer les ordres pour le produit fini pour les périodes inférieures à cet horizon. Là encore, il s'agit d'un paramètre qui pourra être testé et qui fait écho au contexte industriel.
- b) Les données techniques, globalement le modèle doit pouvoir intégrer des données réelles pour les cas in-vivo et créer des données pour les modèles in-vitro. Les hypothèses de création sont explicitées pour chacune des données techniques
- **Le choix du mode de gestion** : le modèle doit permettre de faire un choix par article et non pas global. Ainsi chaque article pourra bénéficier de ses propres paramétrages. Cela permet de tester des PPC hybrides.
 - **Les nomenclatures** : le modèle devra intégrer des nomenclatures complexes c'est-à-dire avec une hauteur et une largeur importantes. La gestion des cas d'emplois multiples devra également être incorporée tant dans la nomenclature que dans le calcul des besoins. Dans le cas des expérimentations in vitro, ces nomenclatures pourront être générées de façon aléatoire compte tenu de 3 éléments : la hauteur, la largeur et la densité.
 - **Les gammes** : le modèle devra être capable d'intégrer des gammes complexes avec éventuellement des passages sur une même ressource à différents moments de la gamme. Le recours à des opérations de sous-traitance au sein de la gamme doit également être intégré. Concernant les données in-vitro, il a été décidé de limiter les gammes à une seule opération effectuée sur un poste dédié affecté automatiquement en fonction du code de la référence. Ex : la référence 10 est fabriquée sur le poste 10.
 - **Les temps opératoires** : Ils seront donnés pour chaque opération. Nous souhaitons étudier l'impact de la variabilité totale du processus de production, mais nous ne souhaitons pas réaliser une analyse fine des causes de variation des temps opératoires. Dès lors, la variabilité des temps de production est intégrée en appliquant des coefficients aux temps opératoires prévus. Dans les cas in vitro, les

temps devront être calculés à partir des délais souhaités par article et d'un taux de charge cible par ressource.

- **Les temps de réglage** : ces temps peuvent être intégrés, par opération, en cas de besoin. Par contre, la problématique d'optimisation des temps de réglage en fonction des enchainements de séries ne sera pas considérée. Les temps seront donc fixes et non dépendants des séries précédentes. Pour les cas in-vitro, ils ne sont pas déterminés automatiquement mais peuvent être intégrés manuellement.
- **Les temps de transfert** : ils représentent les temps de transit interpostes indépendamment des files d'attente, ils sont donnés en temps moyen, mais pourront être modifiés par l'application d'un coefficient issu d'une loi statistique. Comme évoqué précédemment, la manutention stricto sensu ne fait pas partie du périmètre. Pour les cas in vitro, nous appliquons les mêmes modalités que pour les temps de transfert.
- **Lead time de planification** : les lead time de planification sont les délais donnés par article qui permettent de définir la date de lancement d'un ordre par rapport à la date de disponibilité attendue. Il correspond au délai anticipé entre le moment du lancement d'un ordre et sa fin présumée.
- **Les coûts** :
 - o Pour les articles achetés : le coût des matières est une donnée d'entrée,
 - o Pour les articles fabriqués : les coûts des articles fabriqués sont obtenus par agrégation des coûts des composants, auxquels s'ajoutent les coûts de fabrication intégrés au fil du processus productif en ajoutant les coûts horaires (donnée d'entrée) des temps opératoires.
- **Le stock initial** : afin d'éviter les ruptures le stock initial de chaque article inclut le stock de sécurité s'il en existe un et la couverture de la demande pendant son délai de réapprovisionnement initial.
- **Le stock de sécurité** : au besoin, il peut être calculé de façon stochastique ou déterminé empiriquement en fonction du délai de réapprovisionnement ou d'un nombre de jours de couverture.
- **Les tailles de lot** : elles peuvent être intégrées comme des tailles de lot multiples ou minimum.

Les informations statiques sont celles qui sont susceptibles de faire l'objet de paramétrage dans le modèle. Par ailleurs, certaines permettent de caractériser partiellement l'environnement industriel (horizon ferme, nomenclature plus ou moins complexes par exemple).

Les informations dynamiques

Il s'agit des informations qui évoluent au fil de la simulation et qui alimentent le PPC pour la prise de décision.

- **Les prévisions** : elles pourront être issues de prévisions réelles fournies par une entreprise ou bien générées in vitro. Dans le 1^{er} cas, elles sont simplement importées dans un fichier ad hoc. Dans le second cas, plusieurs options sont proposées mais toutes reposent sur la fixation d'une valeur de référence à déterminer. Elle correspond à la demande « moyenne » par période :
 - o Fixe : la prévision est égale à la valeur de référence,
 - o À profil : on applique des coefficients représentatifs du profil de la demande souhaitée (ramp-up, saisonnalité par exemple) à la valeur de référence. Ces coefficients peuvent être définis à partir d'une étude de données historiques ou bien de cas construits pour la simulation (ex : ramp-up linéaire de 15% par an),
 - o Variable : un tirage aléatoire, basé sur une loi normale centrée sur la valeur de référence et d'écart type paramétrable, est effectué pour définir des séries de prévisions. Ainsi pour chaque réplification, la demande prévisionnelle change.
- **La demande** : la demande réelle sera injectée à chaque période en fonction de l'horizon ferme choisi (pour un horizon de 2 périodes, la demande connue en P1 est la demande réelle de P3). Elle est issue de données réelles ou de scénarii de demande générés. Dans ce 2nd cas, les scénarii consistent à appliquer des coefficients sur la prévision. Ces coefficients sont obtenus par tirage aléatoire sur la base d'une loi uniforme dont le minimum et maximum sont paramétrables. 3 ensembles de 100 coefficients ont ainsi été créés pour définir 3 niveaux. Il est possible d'en ajouter de nouveaux. Dans le cas de systèmes pilotés par la demande (e.g. Kanban), le système peut être rendu aveugle c'est-à-

dire que la prévision n'intervient pas dans le calcul des besoins et ne joue que 2 rôles : le dimensionnement du système de production et la base de calcul pour exprimer la demande réelle à la période voulue.

- **Les niveaux de stock et en-cours** : ils doivent être mis à jour en temps réel c'est-à-dire au fur et à mesure des consommations et des entrées en stock.
- **La mise à jour dynamique du dimensionnement des stocks** : le modèle effectuera les calculs en fonction de la fréquence de mise à jour choisie. La pratique industrielle considère souvent une mise à jour annuelle (voire moindre) des paramètres de MRP2. Une mise à jour à chaque période est également possible comme cela est recommandé avec DDMRP. Dans ce cas, les zones des buffers sont actualisées en fonction du recalcul périodique de la consommation moyenne, mais cela ne change pas les paramètres du calcul choisis au niveau tactique.
- **Les indicateurs** : ils seront calculés à chaque fin de période et compilés en fin de simulation pour une étude de la moyenne et des intervalles de confiance et de leurs évolutions en fonction des plans d'expériences.

Les différents éléments du modèle ont été exposés. Ils constituent la base du cahier des charges du simulateur. Le cadre expérimental permet d'ajouter les objectifs en termes d'exigences des plans d'expériences.

V-1.3 Le cadre expérimental

Le cadre expérimental fixe le cadre et les objectifs des plans d'expériences, i.e. ce pour quoi la simulation est utilisée, donc les questions auxquelles on souhaite répondre au travers des plans d'expériences. Il fixe également les indicateurs qui permettront d'évaluer la performance au regard des objectifs fixés. Nous donnons ici une vision globale des objectifs et des indicateurs correspondants.

L'objectif du modèle de simulation est de pouvoir évaluer la performance de différents PPC. Les PPC sont considérés comme le moteur du système productif qui permet de planifier et exécuter la production et donc de répondre à la demande client. L'évaluation de leur performance comporte donc 2 aspects à intégrer dans le cadre expérimental :

- Les composantes de l'environnement industriel : l'objectif est d'identifier si les PPC sont plus ou moins adaptés à certains contextes.
- Le choix du PPC et son paramétrage : la performance peut également être liée aux choix de paramétrage des PPC. Les plans d'expériences devront donc permettre de les faire varier afin d'évaluer leur impact.

Le détail des paramètres utilisables dans les plans d'expériences est lié aux PPC eux-mêmes. Ils émergent au fil de l'utilisation cadre méthodologique. Les plans d'expériences eux-mêmes font partie de l'instanciation du modèle et ne sont donc pas présentés dans ce chapitre.

Concernant les indicateurs, comme évoqué au Chapitre 3, notre vision de la performance globale s'appuie sur 3 dimensions: Client, Financière et Industrielle. Le modèle intègre des indicateurs représentatifs pour chacune d'entre elles :

Le modèle de simulation mesure l'ensemble de ces indicateurs pour permettre leur comparaison entre différentes expériences. Ainsi des processus de normalisation des indicateurs sont intégrés pour écarter les problèmes de volume de production ou de coût par exemple :

- Création d'une base 100 équivalente à la moyenne de l'indicateur pour le coût des stocks,
- Utilisation du coût d'une unité en stock pour les expérimentations faisant appel à un nombre différent de références d'une réplication à l'autre (cas in vitro).

Une analyse des intervalles de confiance permet de valider leur représentativité et donc leur utilisation pour les analyses approfondies. Afin de faciliter ces dernières, le modèle doit remonter ces indicateurs par expérience, mais également par répliquions et proposer une mise en forme adéquate et automatisée.

Les indicateurs sont les sorties du modèle de simulation qui permettent de conclure sur les plans d'expériences. Ils permettent de savoir si le PPC étudié permet de répondre à la demande client i.e. OTD et

profondeur du retard, avec quel impact sur le système productif (temps de traversée et taux de charge) et à quel « prix » (stock et en-cours). Les facteurs utilisés pour les plans d'expériences permettent de comprendre les conditions de la performance : les paramètres internes du PPC et externes (environnement). Ces analyses et conclusions contribuent à l'alimentation des livrables, mais alimentent également les interfaces en faisant émerger de nouveaux questionnements.

Au sein de P2, le modèle de simulation intègre 2 parties. La partie modélisation et le détail de ses 3 composants (système réel, cadre expérimental et modèle) ont été présentés permettant de comprendre les objectifs de l'évaluation, l'objet de l'étude et le détail du modèle. Le modèle de simulation intègre une seconde partie, le simulateur. Ce dernier reproduit le fonctionnement du modèle tel que défini dans la partie modélisation et mesure dynamiquement les indicateurs choisis pour définir la performance.

V-2 Le simulateur

Pour (Zeigler et al., 2019) le simulateur est vu « comme n'importe quel système de calcul (tel qu'un processeur unique, un réseau de processeurs, l'esprit humain, ou plus abstraitement un algorithme), capable d'exécuter un modèle pour générer son comportement. Au sein de notre modèle de simulation, le simulateur est un outil informatique qui s'appuie sur 2 composants : un système de gestion de base de données (SGBDD) et un simulateur à événements discrets qui jouent chacun un rôle particulier. Après avoir présenté les raisons du choix de la simulation à événements discrets (DES), nous présenterons l'architecture de notre simulateur puis détaillerons ses 2 composants.

V-2.1 Recours à la simulation à événements discrets (DES)

L'étude de la performance d'un PPC se situe dans le champ de l'évaluation de la performance des systèmes complexes. Dès lors, comme discuté dans Chapitre II, les possibilités de modélisation des systèmes sont nombreuses. Notre objectif, dans cette étude quantitative, est d'évaluer la performance d'un PPC dans le cadre d'un système productif. Dès lors, étant donné **la nature complexe des processus et des flux du système étudié, les aspects stochastiques et les règles de gestion dynamique** à prendre en considération, la simulation apparaît, comme la méthode la plus adaptée.

Parmi les types de simulation, la **simulation à événements discrets (DES) est le type de méthode qui répond le mieux aux attentes**. Elle permet en effet de prendre en considération la complexité du système industriel étudié ainsi les aspects stochastiques à différents niveaux. Elle intègre également l'aspect **dynamique des décisions et en évalue l'impact sur la performance**. D'après Jeon and Kim (2016), 45% des 131 articles étudiés dans leur revue de littérature consacrée aux techniques de modélisation et simulation pour les PPC ont recours aux DES ce qui en fait l'approche la plus utilisée dans le cadre de l'évaluation des PPC. Il paraît donc opportun de considérer ce type de solution compte tenu de notre objectif de recherche.

Selon (Banks et al., 2014), le recours aux DES est justifié dans une dizaine de situations différentes. L'objectif de l'étude à savoir l'évaluation de la performance d'un PPC correspond à 5 d'entre elles :

- 1- *Étude d'un sous-système et de ses interactions avec un système complexe, c'est le cas du PPC et du système de production*
- 2- *Simulation de changements informationnels, organisationnels et environnementaux et étude de l'impact sur le comportement du modèle, certaines variables du contexte industriel pourront être modifiées pour vérifier leur impact sur la performance*
- 3- *La connaissance acquise lors de la construction du modèle peut être utile pour l'amélioration du système étudié : la construction du modèle pourra contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement du PPC et alimenter l'étude qualitative.*
- 4- *La modification des entrées de la simulation et l'observation des résultats peut conduire à une meilleure connaissance des variables les plus importantes et des interactions entre les variables : le modèle de simulation doit permettre d'identifier les variables effectivement influentes parmi celles repérées dans l'étude qualitative*

- 5- *Un système moderne, est tellement complexe que ses interactions internes peuvent seulement être traitées grâce à la simulation.* La nature complexe du système de production et de son sous-système décisionnel (le PPC), justifie à elle seule le recours à la simulation.

V-2.2 Architecture générale du simulateur

L'objectif étant de comprendre un PPC et d'évaluer l'impact de facteurs internes et externes sur sa performance quantitative, il s'agit pour le modèle de simulation de reproduire les processus récurrents conduisant à la création des ordres de fabrication et d'approvisionnement et d'en apprécier la performance. Le modèle de simulation doit permettre :

- De l'utiliser pour différents PPC sans avoir à reprendre le modèle afin de comparer les solutions dans le même contexte.
- D'effectuer, pour un même PPC, des plans d'expériences basés sur :
 - o Différents contextes et organisations industrielles,
 - o Plusieurs choix de paramètres.

Nous nous appuyons sur la construction d'un **simulateur paramétrable** i.e. embarquant des options de configurations permettant de réaliser les plans d'expériences, pour différents PPC et dans différents contextes industriels, avec le même outil. Le fait d'utiliser le même simulateur permet d'effectuer des comparaisons objectives des indicateurs de performance, en évitant au maximum l'influence des choix effectués lors de la construction. Les modifications devront être réalisées uniquement par le changement de paramètres, sans changer la structure même du modèle. Elle permet également un gain de temps important pour la réalisation de différents plans d'expériences et des allers-retours entre expériences in vitro et in vivo permettant d'améliorer la compréhension du comportement du PPC.

Nous avons donc décidé de créer **un simulateur composé de 2 outils** : un système de gestion de base de données (SGBDD) et un logiciel de simulation à événements discrets (DES). Cette organisation permet de :

- Séparer ce qui relève du paramétrable (SGBDD) et de l'évaluation de la performance (DES) qui est ainsi toujours réalisée de la même manière.
- Éviter de modifier le DES à chaque changement de plan d'expériences ce qui demanderait un investissement conséquent. Fixer sa structure permet un gain de temps non négligeable.
- Éviter l'influence de la structure du DES sur les résultats et donc améliorer les analyses de résultats issus de plans d'expériences différents.

Comme indiqué dans la [Figure V-4](#), les outils communiquent dynamiquement mais chacun joue son propre rôle :

- Le **SGBDD reproduit le fonctionnement du PPC** d'une entreprise. Il contient la base de données et les traitements automatisés permettant de **réaliser le plan de production et d'approvisionnement**. Il gère également le **prétraitement** nécessaire à la simulation, et le **post-traitement** des indicateurs importés du logiciel de simulation à événements discrets.
- Le **DES est un joueur qui exécute dynamiquement les ordres** de production et d'approvisionnement **issus du PPC**. Il intègre les **aléas** qui pourraient survenir dans un système productif (dérives des délais d'approvisionnements et de fabrication). Il calcule les **indicateurs** qui permettent d'évaluer la performance des PPC en **contexte stochastique**.

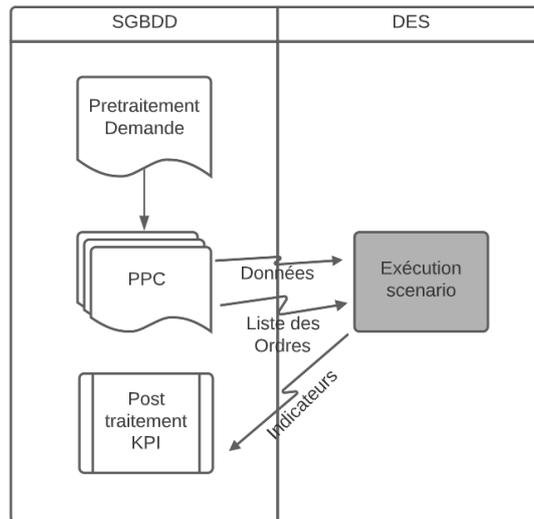


Figure V-4 Architecture globale du simulateur

Le détail des rôles, des traitements et paramètres présenté de chaque composant est présenté dans les paragraphes suivants.

V-2.3 Le système de système de gestion de base de données : cœur du PPC

Le SGBDD remplit 3 fonctions au sein du simulateur : pré et post traitement et partie PPC.

Prétraitement

Le rôle d'un PPC est de générer les ordres de fabrication et d'approvisionnement permettant de répondre à la demande par période. Au sein du Simulateur, la phase de prétraitement permet créer les scenarii de demande qui seront utilisés lors des plans d'expériences. Le simulateur utilise 2 types de demande :

- La demande prévisionnelle : en fonction des PPC, elle est utilisable pour dimensionner le système productif et/ou pour générer des ordres prévisionnels de production et d'approvisionnement :
 - o Pour les cas in vitro, elle est entièrement générée sur la base de 2 paramètres :
 - *Les profils-types de demande* : stable, saisonnier ou ramp-up c'est-à-dire une croissance linéaire de la demande. Ces profils de base sont générés avec une valeur de référence qui correspond à une demande moyenne par produit par période,
 - *Le volume* : le choix est d'affecter un coefficient à la demande par période afin de pouvoir tester l'effet du volume de la demande sur la performance du PPC. Les coefficients retenus sont présentés dans le [Tableau V-1](#) suivant.

Tableau V-1 Valeurs des paramètres de volume

Paramètres	Intensité	coefficient volume
1	faible	1
2	moyen	100
3	fort	1000

- o Pour les cas in vivo, il s'agit de mettre en forme les données de l'entreprise pour les rendre compatibles avec le simulateur.

- La demande réelle : afin de représenter la variabilité client, nous choisissons d’appliquer à la prévision un coefficient pour générer la demande réelle. La demande réelle de la période p se calcule avec la formule suivante :

$$Demande\ réelle_p = Demande\ Prévisionnelle_p \times coefficient\ d'aléa\ (7)$$

Le coefficient d’aléa est généré par un tirage aléatoire basé sur la loi uniforme. L’utilisation de cette loi permet de maintenir la demande totale sur la durée de la simulation. Nous avons défini 3 niveaux de variabilité :

- Faible : Uniforme (0.95, 1.05), ce qui correspond au minimum et maximum des valeurs possibles pour le coefficient,
- Moyenne : Uniforme (0.8, 1,2),
- Forte : Uniforme (0.5, 1,5).

Pour chaque niveau, un ensemble de 100 séries (nombre maximum de répliquions par expérience) de 200 coefficients (nombre maximum de périodes) est créé à partir d’un générateur de nombres aléatoires. Il servira de base pour la création des scenarii.

La compilation des 2 premiers éléments (profils-volume) permet de créer les sets de prévisions qui, combinés à la variabilité, créent les scenarii de demande utilisés par la simulation. Ces prétraitements effectués, ces informations sont ensuite basculées dans le PPC, cœur du modèle de simulation.

Le PPC

L’outil représente l’exécution des processus récurrents du PPC conduisant à la création des ordres de fabrication et d’approvisionnement. Il est constitué d’un ensemble de tables regroupées dans un fichier de base spécifique à chaque plan d’expériences.

Parmi ces tables, on distingue celles qui regroupent des données et celles qui résultent de l’exécution des processus de planification. Concernant les données d’entrée, le SGBDD regroupe plusieurs tables regroupées en 2 catégories qui lui servent de socle pour la création des fichiers d’expériences. On en distingue :

- **Les données du cas étudié** : il s’agit de regrouper l’ensemble des données du système d’information du système productif de l’entreprise. La base comprend plusieurs tables dédiées à ce type de données d’entrée:
 - o *Base articles* avec l’ensemble des paramètres de chaque référence (mode de planification, stock initial, stock de sécurité, coût unitaire, Lead time de Planification...). On peut intégrer jusqu’à 100 références dans le modèle quelle que soit leur nature (produits finis, semi-finis ou achetés). La [Figure V-5](#) est un exemple des données de base à renseigner. Les données spécifiques à un PPC sont intégrées dans des colonnes supplémentaires.

Code Article	A_Ref	Type	Stock initial	LT	Consommation moyenne	Coût unitaire	valeur stock	mode de gestion	taux de service visé	stock sécurité	seuil	Taille de lot
	1	1	80	1	100	581,4	46 512,0	1	90%	1,00	101,00	1,0

Figure V-5 Extrait du SGBDD, données de base de la table « base articles »

- o *Nomenclatures*, elles peuvent être entrées manuellement ou être importées de fichiers externes. Elles sont présentées sous forme matricielle de dimension 100x100 en écho au nombre d’articles.
- o *Gammes* : cette matrice comprend, pour chaque article, jusqu’à 20 phases. Contrairement à la réalité industrielle, la gamme sert également les articles achetés et la sous-traitance. Les codes utilisés correspondent soit au numéro de la cellule de production exécutant la tâche ou soit au fournisseur.
- o *Temps opératoires* : en écho aux gammes, cette matrice comprend les temps exprimés en unités de temps par pièce pour les articles fabriqués ou par lot pour les articles achetés.
- o *Temps de réglage* : exprimés pour le lot (en unités de temps).

- *Temps de transfert* : exprimés pour le lot (en unités de temps).
- *Calendrier* : plusieurs calendriers sont possibles, l'affectation aux ressources se fait ensuite dans les paramétrages des ressources.
- *La composition des cellules de production* : le nombre de ressources identiques présentes dans chaque cellule. Il peut être saisi ou généré en fonction du calcul de charge réalisé à partir des prévisions de long terme.
- Les autres informations viennent compléter ces données et sont regroupées dans la table de paramètres génériques
 - Les paramètres de planification :
 - Le PPC utilisé pour les calculs.
 - La durée : elle correspond à l'horizon de planification et est fixée en nombre de périodes. Compte tenu de la réalité industrielle, la durée doit être suffisamment étendue pour représenter des industries à cycle long. Les délais totaux entre la commande du client et la livraison peuvent atteindre plusieurs mois dans certains domaines d'activités. Il est donc important de pouvoir planifier sur un horizon suffisamment long (jusqu'à 2 voire 3 ans) pour mesurer les effets des choix de paramétrage du PPC sur la performance client. Une partie des objectifs de l'étude est d'évaluer l'impact de facteurs du contexte industriel, l'horizon de planification en fait partie. Il faut par conséquent laisser le choix à l'utilisateur et non le fixer définitivement pour le modèle.
 - L'horizon ferme : il correspond au nombre de périodes pour lequel la demande est gelée c'est-à-dire que les commandes sont fermes et donc non modifiables.
 - Le coût horaire des ressources.
 - Le taux de charge cible : il sert dans les cas de calcul automatique de la capacité
- **Caractéristiques du plan d'expériences** qu'on souhaite réaliser :
 - Le nombre d'expériences : Le modèle doit permettre d'enchaîner les expérimentations de façon automatique au sein d'un même plan d'expériences. Pour chaque plan, le nombre d'expériences menées sera calculé et dépendra du nombre de paramètres testés et de leurs modalités.
 - Le nombre de réplifications : afin d'obtenir des résultats fiables, chaque expérimentation devra comporter plusieurs dizaines de réplifications.
 - Facteurs d'expérimentations : Les paramètres de la planification pourront constituer des facteurs des plans, mais d'autres pourront s'ajouter en fonction des résultats issus des phases P0 et P1.

À partir des données, le simulateur exécute les processus de planification tels que définis par le PPC étudié. Ainsi, à titre d'exemple pour MRP2, sur la base des prévisions un plan industriel et commercial permettra de définir les besoins et les capacités sur la durée de la simulation. Ensuite, le processus se poursuit avec l'établissement du plan directeur de production et du calcul de besoins net. Les décisions de lancement sont prises période par période en considérant les différentes variables telles que le stock réel, la demande réelle, les approvisionnements prévus... **Quelle que soit la méthode de détermination des lancements, le résultat est l'établissement d'un plan de production et d'approvisionnement** centralisant les ordres article par article et période par période. La liste des ordres est une matrice de dimensions (j articles x Nombre de réplifications) et p périodes dont le contenu de chaque case correspond à la quantité de l'ordre de fabrication (OF) ou d'approvisionnement (OA) pour un article et pour la période considérée. La [Tableau V-2](#) est un extrait d'une liste d'ordres obtenue à l'issue du processus PPC effectué au sein du SGBDD.

Cette liste est établie sur la base de la demande réelle, i.e. en tenant compte de la variabilité client. Les paramètres et algorithmes de chaque PPC permettent de déterminer les besoins en composants achetés ou fabriqués en fonction de cette demande réelle.

Tableau V-2 Extrait du tableau récapitulatif des ordres issus des processus PPC du SGBDD

référence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	100	100	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107
2	100	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96
3	100	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96
4	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
5	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
6	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
7	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
8	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
9	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
10	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
11	100	100	93	98	105	87	86	95	87	112	110	110	106	89	114	111	88	102	107	96	114
12	0	0	215	0	193	0	197	0	160	0	187	0	241	0	227	0	217	0	180	0	214

Le choix a été fait d'intégrer la variabilité client dans le SGBDD. Ce choix est guidé par 2 arguments. D'une part, la prise en compte de la variabilité client pourrait être effectuée par le DES. Cependant, le recalcul des besoins, issu des modifications de la demande, alourdit considérablement le modèle et conduit à des temps de calculs déraisonnables pour exploiter des cas complexes. D'autre part, ce choix permet de réaliser des scénarii « standards » de demande qui servent de base à toutes les expérimentations ce qui peut faciliter les analyses.

Cette 1^{ère} étape de la simulation conduit donc à la création d'un fichier, par expérience et pour l'ensemble des réplifications prévues, qui comporte les données nécessaires à la simulation dynamique et les résultats des processus de planification récurrents (listes des ordres). Ce fichier permet le transfert des informations au DES. Ce dernier est un joueur qui permet d'inclure la dimension dynamique et la variabilité au sein du processus d'approvisionnement et de production et calculer dynamiquement les indicateurs qui en découlent.

V-2.4 Le simulateur à événements discrets comme joueur

Présentation générale

Le SGBDD effectue la 1^{ère} phase de la simulation en générant le fichier des ordres. Pour la simulation à événements discrets, notre choix s'est porté sur le logiciel Arena de Rockwell Software qui est très largement utilisé dans le cadre des PPC. Ce logiciel, précurseur parmi les logiciels DES, mais peu évolué côté ergonomie, présente cependant une forte capacité de calcul et un interfaçage avec les tables. Par ailleurs, sa partie code VBA lui confère une certaine souplesse dans l'exécution de la simulation et dans la récupération des indicateurs.

Dans notre cadre méthodologique, Arena est un joueur dont le rôle est le calcul de la performance dynamique du plan de production calculé par le PPC dans la phase précédente. La simulation est démarrée via Arena qui récupère pour chaque expérience les fichiers générés par le PPC pour intégrer les variables nécessaires à la simulation et le fichier des ordres à lancer. Arena exécute le plan de production tel que prévu lors de la 1^{ère} phase de la simulation.

Arena ajoute également une dimension stochastique au plan de production prévu pour tenir compte de la réalité des industriels qui sont très largement confrontés à la survenue d'aléa. La variabilité est intégrée au niveau des temps opératoires et des délais de livraison fournisseurs en leur appliquant des coefficients d'aléas basés sur des lois uniformes définies dans le protocole expérimental.

La structure du DES

La structure du modèle développé est présentée dans la [Figure V-6](#) ci-dessous. Elle intègre une partie flux d'information incluant 3 sous-processus la génération des ordres de fabrication (OF) et des ordres d'approvisionnement (OA), la mise en stock après livraison des fournisseurs ou achèvement de la production, et la livraison au client. Il comprend également la partie flux physiques qui prend en charge l'atelier et les fournisseurs.

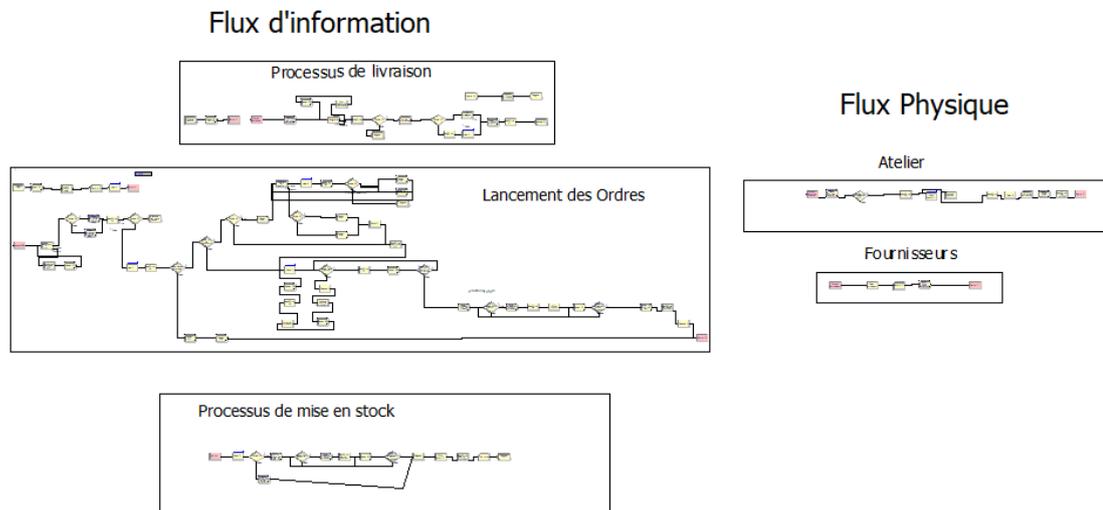


Figure V-6 Vision globale du modèle Arena

Le modèle a été dimensionné pour accueillir jusqu'à :

- 100 articles au total quelle que soit leur type (vendu, acheté ou fabriqué). À l'extrême, on peut donc avoir 1 produit fini composé de 99 composants (achetés ou fabriqués).
- 100 cellules de production qui sont représentées par des sets de stations de 10 ressources.
- 100 fournisseurs de composants et de sous-traitance.

L'instanciation, permettant le dimensionnement du modèle, se fait au lancement de chaque réplication après vérification des paramètres. Le modèle est donc capable d'enchaîner automatiquement des répliques intégrant des environnements productifs très différents (Nomenclature, nombre d'articles, dimensionnement atelier). Arena communique via VBA avec le fichier source généré par le SGBDD.

Au sein du modèle **les entités sont la demande client, les ordres de fabrication et d'approvisionnement** qui passent par les différents processus pour représenter les flux tels qu'ils seraient exécutés dans une entreprise industrielle.

Le processus de simulation du DES

Pour chaque expérience, voire réplication si les facteurs retenus l'imposent, au lancement d'Arena, les différentes variables sont instanciées par la remontée d'information depuis le SGBDD par code VBA.

Une fois le modèle paramétré, comme indiqué par la [Figure V-7](#), les macro processus mis en œuvre dans Arena sont peu nombreux.

- Le lancement des ordres : le SGBDD génère en fonction des méthodes du PPC, une liste d'ordre de fabrication (OF) ou d'approvisionnement (OA). Ainsi pour chaque période et pour chaque article, une quantité à acheter ou à produire est définie. Cette quantité représente l'ordre de fabrication (OF) ou l'ordre d'approvisionnement (OA). À partir de cette liste d'ordres, au début de chaque période, le DES :
 - o Envoie les Ordres d'achat aux fournisseurs, ces derniers sont capacitaires, mais Arena applique la loi Uniforme choisie pour perturber le délai de livraison. Ainsi, les livraisons ne sont pas toujours disponibles dans les délais attendus, ce qui peut engendrer une dérive dans les délais de production.

- Vérifie l'état des stocks pour les produits fabriqués. L'indisponibilité des composants conduit à la mise en attente, les ordres en retard étant prioritaires sur les autres. Ce choix conduit à minimiser le retard moyen au détriment de l'OTD (plus d'ordres en retard, mais avec une profondeur de retard moins importante).
- La fabrication dans l'atelier : une fois les ordres lancés, la fabrication débute ce qui correspond à l'envoi des OF vers les ressources en fonction des gammes de chaque produit. Chacune dispose d'une file d'attente qui est gérée par défaut en FIFO (First In First Out). Les ressources, une fois mobilisées, appliquent des temps opératoires unitaires et éventuellement des temps de réglage. Le temps total est perturbé par un coefficient d'aléa basé sur une loi uniforme fonction du paramètre de variabilité Process.
- L'envoi des ordres d'approvisionnement aux fournisseurs : les produits achetés ou fabriqués comportant une opération de sous-traitance sont traités de la même manière. Ils sont envoyés grâce à la gamme vers les stations fournisseurs où le délai réel résulte du temps standard auquel on applique le coefficient d'aléa issu de la loi uniforme correspondant au paramètre de variabilité fournisseurs.
- La mise en stock : les articles sont mis en stock à l'issue du processus de production ou d'approvisionnement. Compte tenu des aspects stochastiques, les périodes de mise en stock ne sont pas forcément respectées.
- La livraison au client. : le processus est simple : pour chaque date la demande réelle est lue dans le fichier, l'état des stocks de produits finis est vérifié. La disponibilité conduit à la livraison immédiate. Il n'est pas possible de livrer par anticipation même si les stocks sont suffisants. En cas de rupture, la commande est mise de côté et sera livrée dès que la totalité demandée sera disponible. Il n'est pas possible d'effectuer des livraisons partielles.

Comme dans l'industrie, c'est la livraison au client qui déclenche le calcul de la performance client (OTD et profondeur de retard éventuelle). Les délais réels issus du DES étant stochastiques, les périodes de disponibilités initialement prévues ne sont pas forcément respectées ce qui constitue le cœur de l'évaluation de la performance. Le PPC permet-il de résister aux aléas de délais OTD et profondeur du retard) ? À quel coût (valeur des stocks et en-cours) ? Avec quel impact sur le système industriel (taux de charge et temps de traversée). Contrairement à l'OTD, les autres indicateurs sont enregistrés en continu.

C'est l'analyse de l'ensemble de ces indicateurs issus de la simulation ainsi que des indicateurs intégrés à Arena (taille des files, temps d'attente moyen notamment) qui permet d'évaluer la performance. Cette analyse apporte des résultats quantitatifs (niveau des indicateurs) et qualitatifs (compréhension des paramètres influents et du fonctionnement du PPC) qui contribuent au cadre méthodologique.

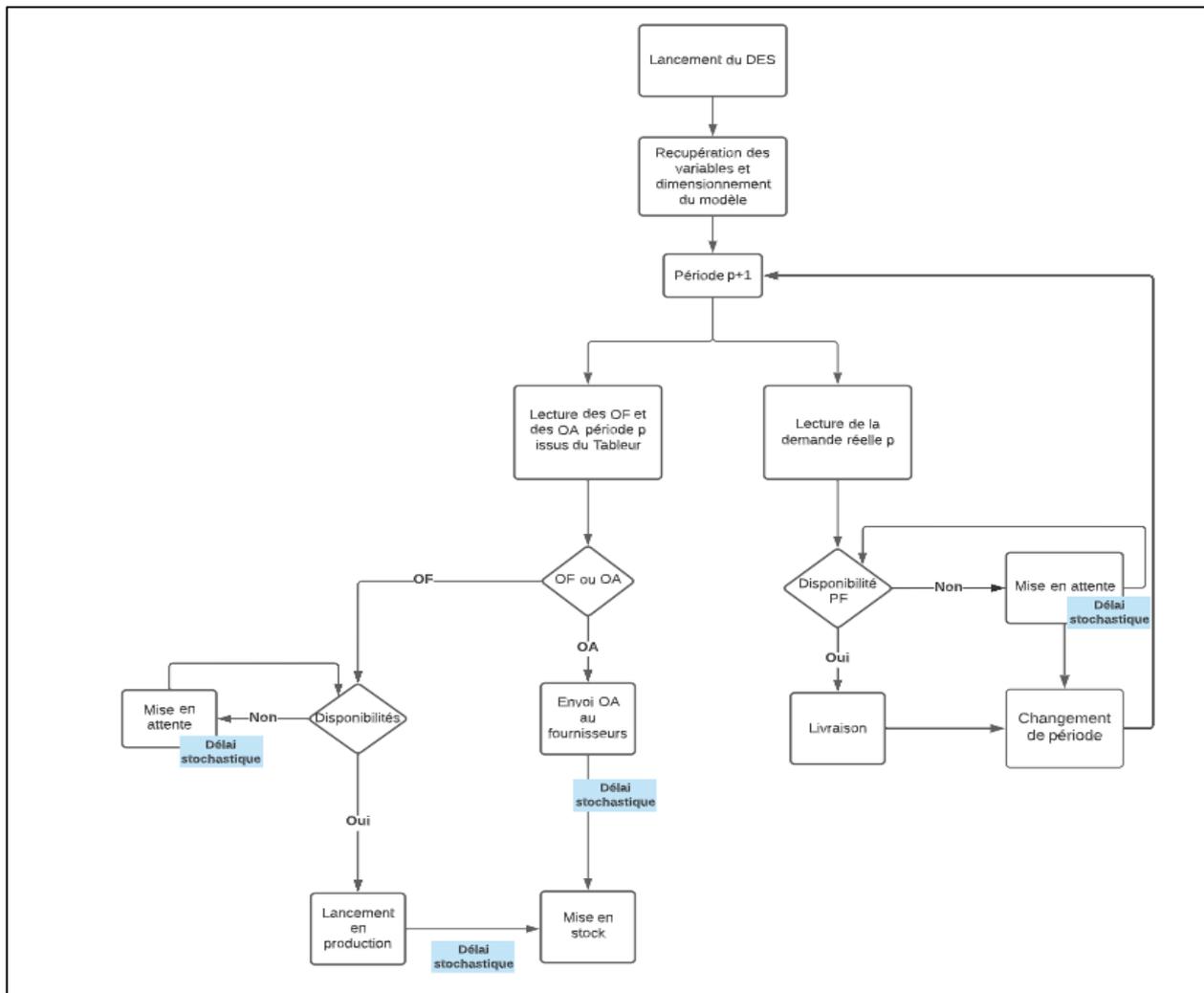


Figure V-7 Représentation des macro processus DES

La nature adaptable du cadre méthodologique proposé a conduit à la construction d'un simulateur articulé autour de 2 outils : un SGBDD intégrant la partie paramétrable et un DES permettant l'évaluation dynamique de la performance. Les raisons de ce choix et le détail de chaque outil ont été présentés. Ce simulateur n'est lui-même qu'une partie du modèle de simulation qui est intégré de façon plus générale dans le cadre méthodologique. Le paragraphe suivant détaille cette intégration.

V-3 Intégration du modèle de simulation dans le cadre méthodologique

Le modèle de simulation est au cœur de la phase P2-étude quantitative. Comme explicité au début de ce chapitre et dans les chapitres 3 et 4, les interactions entre les phases sont nombreuses. Implicitement, dans le cas de P2, il s'agit d'interactions entre le modèle de simulation et les phases P0 et P1. Nous avons précédemment évoqué le fonctionnement et la nature des interfaces, nous présentons ici les liens avec les différents composants du modèle de simulation.

Comme indiqué dans la [Figure V-8](#), nous nous appuyons sur la représentation de [\(Zeigler et al., 2019\)](#) pour mettre en évidence les relations entre les composants du modèle simulation et les phases P0 et P1.

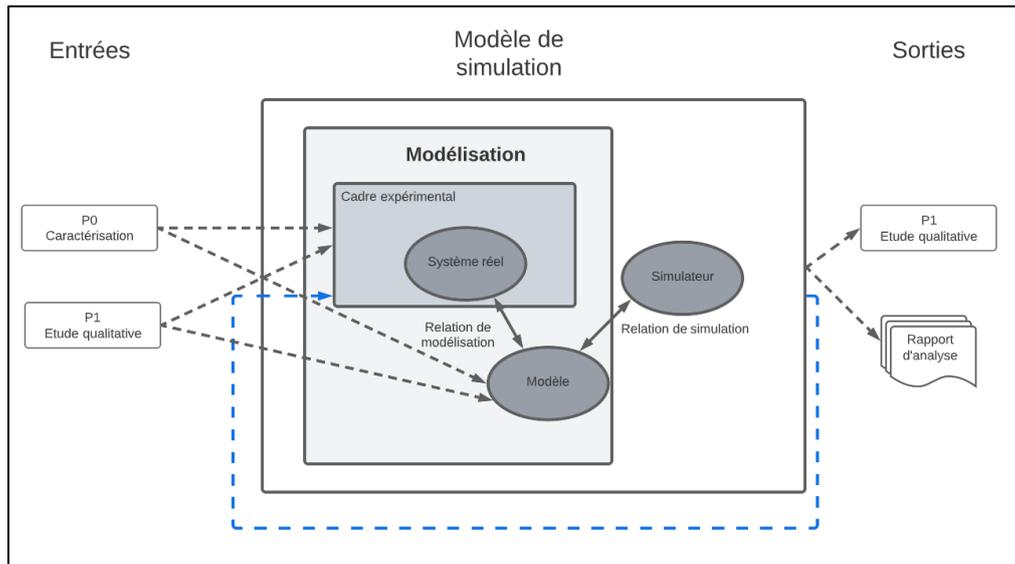


Figure V-8 Interactions modèle de simulation et cadre méthodologique proposé

Notons qu'il existe une boucle de rétroaction entre les résultats générés par P2 et les inputs utilisés ultérieurement. Le détail des entrées et des sorties est présenté dans les paragraphes suivants.

V-3.1 Les entrées

La construction du modèle paramétrable d'évaluation des PPC doit répondre aux impératifs communs à tous les DES. Une étude de la littérature dédiée à la modélisation et la simulation à événements discrets permet d'intégrer ces éléments.

Le modèle de simulation, une fois construit, est alimenté par les phases P0 et P1. Cependant les contributions ne touchent pas les mêmes composants du modèle de simulation.

P0 permet de comprendre le fonctionnement général du PPC et donc d'en tirer les éléments méthodologiques qui en découlent concernant le PPC étudié. Elle joue donc 2 rôles :

- Paramétrer le modèle et le simulateur en fonction du PPC étudié, voire créer des options de configuration si le PPC étudié propose des solutions originales. Ces adaptations sont intégrées sous forme d'options du modèle, la philosophie est de développer le modèle unique d'évaluation des PPC pas de créer un modèle ad hoc par PPC. Le transfert d'informations entre la phase caractérisation et le modèle est réalisé grâce aux livrables du rapport d'analyse, particulièrement D3 Synthèse des Éléments Constitutifs qui inclut les détails de la méthodologie du PPC étudié.
- Construire les plans d'expériences du cadre Expérimental grâce à des hypothèses concernant les paramètres susceptibles d'influencer la performance. P0 fait ressortir des interrogations portant sur (1) les éléments de contexte industriel (Délivrable 2) et (2) les paramètres propres au PPC qui favorisent ou défavorisent la performance du PPC.

P1 apporte un approfondissement de la compréhension notamment grâce à l'étude de retours d'expériences. Elle alimente le modèle de simulation sur 2 composants :

- Sur le modèle et le simulateur : Elle apporte une vision plus précise et peut soulever des points techniques que seule la pratique peut faire émerger. Ces interrogations sont intégrées dans la partie l'interface des livrables et particulièrement D3 Éléments Constitutifs, ils permettent d'ajuster les spécifications si nécessaire.
- Sur le cadre expérimental : la Phase Qualitative précise la définition des contextes industriels et des paramètres influents qui sont respectivement intégrés aux livrables D2 Grille d'Analyse des caractéristiques du PPC et D3 Synthèse des éléments constitutifs. Les résultats qui demandent à être précisés ou qui sont en contradiction avec la Phase de caractérisation sont stockés dans la partie

Interface de ces dérivables et peuvent servir de base pour la construction de plans d'expériences. Par ailleurs, la Phase Qualitative peut également faire émerger des comportements non décrits du PPC dans la littérature dédiée générant des inconvénients ou des risques à considérer lors de son utilisation. Ces éléments sont intégrés dans le dérivable D4 Analyse Bénéfices/Risques. Le modèle de simulation sert alors de base expérimentale pour réaliser des Preuves de concepts pour confirmer ou infirmer l'existence de ces comportements.

Enfin, les résultats de certaines expériences de P2 peuvent conduire à formuler de nouvelles hypothèses qui servent de base à de nouveaux plans ou preuve de concept.

Comme le postule le cadre méthodologique, le modèle de simulation est influencé par les 2 autres phases mais également par les résultats de P2 elle-même. De la même manière, il contribue lui aussi aux autres composants du cadre méthodologique à travers les sorties qu'il génère.

V-3.2 Les sorties

L'utilisation du modèle de simulation génère des résultats sous forme d'indicateurs. Au sein du modèle de simulation, les indicateurs sont analysés afin de tirer des conclusions en fonction des hypothèses posées. Ces analyses contribuent elle-même à 2 types de sorties (1) celles qui contribuent directement aux dérivables et (2) celles qui enrichissent l'interface avec P1-étude qualitative.

Contributions au Rapport D'analyse

Le modèle de simulation contribue à différents dérivables du rapport d'analyse. Ces contributions dépendent largement du niveau de connaissance du PPC et des choix concernant les plans d'expériences. Une étude complète devrait contribuer à l'ensemble des dérivables excepté D1-Périmètre qui repose sur les 2 autres phases et pour lequel P2 est une entrée et non une sortie. Les contributions aux différents dérivables sont :

- D2 Grille d'Analyse des Caractéristiques Générales du PPC : P2-étude quantitative contribue à la validation d'hypothèses émises par les 2 autres Phases notamment concernant la partie Contexte Industriel. Les plans d'expériences doivent confirmer ou infirmer la pertinence du PPC en fonction de certaines caractéristiques du contexte industriel (Profil de demande, complexité des produits...).
- D3 Paramètres pouvant influencer la performance : là encore, les 2 autres phases conduisent à des hypothèses sur les paramètres internes au PPC les plus influents sur la performance. Pour ce dérivable l'objectif est encore la validation des hypothèses. On peut également intégrer des analyses et commentaires sur les risques qui pèsent spécifiquement sur certains paramètres.
- D4 Grille d'Analyse des indicateurs : P2 fournira des valeurs d'indicateurs permettant de compléter D4 et d'effectuer les comparatifs entre la performance annoncée (caractérisation), la performance in-vivo (issue de retours d'expériences industrielles) et la performance in-vitro i.e. évaluée par simulation.
- D5 Analyse bénéfices/risques : P2 peut permettre de confirmer, à travers des POC, l'existence de risques liés à des comportements inattendus du PPC i.e. non décrits par le PPC, mais retrouvés dans les retours d'expériences. Le fait de pouvoir reproduire les phénomènes in vitro confirme leur existence et contribue à leur compréhension.
- D6 Conclusions et recommandations : Les différents plans d'expériences et POC menés doivent faire ressortir les points clés pour une meilleure compréhension du fonctionnement du PPC et des ressorts de sa performance. P2 peut notamment contribuer à la partie Recommandations de ce dérivable.

P2 alimente la quasi-totalité des dérivables en apportant des résultats quantitatifs (niveau de performance) et qualitatifs (conditions de réalisation de la performance). Cependant, la validité des résultats de la simulation à événements discrets est soumise à plusieurs conditions : (1) **les étapes de validation et vérification du modèle** doivent avoir été effectuées rigoureusement et (2) les résultats doivent être **interprétés** dans le cadre expérimental et donc des **hypothèses sous-jacentes**.

Concernant la 1^{ère} condition, le modèle de simulation qui a été développé a suivi les principales des préconisations faites par (Sargent, 2010) afin de valider et vérifier le modèle : validation des données,

validation du modèle (« conceptual model »), et vérification du simulateur (« computerized model »). Tant que l'utilisation dans le cadre d'une nouvelle expérimentation se borne à son paramétrage, le modèle est considéré comme validé et la structure des données est vérifiée. Cependant il est nécessaire de valider les données utilisées pour chaque plan d'expériences. Notre cadre méthodologique se voulant adaptable, il est également possible d'utiliser un simulateur différent ou d'ajouter des paramètres si celui proposé est insuffisant pour représenter tous les aspects d'un PPC en particulier. Ces 2 cas, création d'un nouveau simulateur ou modification du modèle, doivent faire l'objet d'un processus de validation et vérification.

La 2^{ème} condition, i.e. l'interprétation en fonction des hypothèses, doit être prise en compte dans les conclusions générales qui seront apportées dans les livrables en les limitant aux cas explorés.

Au-delà de la contribution au rapport d'Analyse, P2 génère également des résultats qui alimentent les interfaces.

Contributions à l'interface P2►P1 Étude qualitative

Pour rappel, il n'y a pas d'ordre préférentiel entre les Études Qualitative et Quantitative et nous préconisons des allers-retours entre les 2 pour l'enrichissement des résultats.

Ainsi, P2 peut faire émerger de nouvelles hypothèses concernant les facteurs influençant la performance. Ces hypothèses peuvent ensuite être soumises à des experts lors de P1 qui pourront apporter leur éclairage : cela permet de prioriser la suite des plans d'expériences.

Par ailleurs, des comportements inattendus du PPC peuvent survenir soit lors de l'étape de vérification soit lors de la simulation. Ces comportements doivent être soumis à des experts ou à des praticiens, lors de P1, qui confirmeront ou non leur apparition, les conditions et les éventuelles remédiations utilisées si le phénomène représente un risque.

Pour rappel ces informations sont transférées à P1 par l'intermédiaire de la partie Interfaces des itérations de chaque livrable.

Boucle rétroactive P2-P2

Les résultats peuvent également conduire à relever des phénomènes inattendus ou non annoncés dans la méthode. Dès lors des POC pourront être mis en place au sein de P2 afin de vérifier leur existence et les conditions d'apparition.

L'existence de l'interface entre P1 et P2 et de boucles rétroactives permet de limiter les risques d'interprétation biaisée des résultats de la simulation. Elles permettent de les faire valider par des retours d'expérience issus des analyses de cas réels ou directement des experts.

Conclusion

Au sein du cadre méthodologique d'évaluation de la performance des PPC, P2 contribue à la fois aux livrables du rapport d'analyse et à l'interface avec P1. Son objectif est double : comprendre et évaluer.

Du point de vue de l'évaluation de la performance, il s'agit de savoir si le PPC étudié permet de résister aux aléas de délais par la mesure de l'OTD et profondeur du retard, avec quel impact sur le système productif (temps de traversée et taux de charge) et à quel « prix » (stock et en-cours). Du point de vue de la compréhension. Les facteurs utilisés pour les plans d'expériences permettent de comprendre les conditions de la performance (les paramètres internes du PPC et externes (environnement), mais aussi d'approfondir la connaissance du PPC.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons proposé un modèle de simulation articulé autour de 2 parties: une modélisation basée sur la vision systémique et un simulateur. La partie modélisation a permis de poser le cadre général et le cahier des charges. Il ne s'agit pas de modéliser un système productif en particulier, mais de proposer un cadre général permettant l'évaluation de PPC dans différents contextes. Dès lors, nous nous sommes attachés à modéliser une famille de systèmes productifs simples basés sur la vision systémique d'une supply chain linéaire à 2 échelons. De la même manière, le cadre expérimental a été spécifié pour correspondre à l'évaluation globale de la performance des PPC sur 3 axes (client, financier et industriel).

Le simulateur qui permet de générer le comportement du modèle et d'évaluer la performance des PPC en contexte stochastique a été scindé en 2 composants : un SGBDD et un DES. Les processus intégrés dans le SGBDD conduisent à la création d'un plan de production et d'approvisionnement basé sur le PPC étudié. Le DES est un joueur qui utilise le plan et permet de calculer dynamiquement les indicateurs en contexte stochastique.

Conformément au cadre méthodologique, les hypothèses à tester grâce aux plans d'expériences seront issues des 2 autres phases qui apportent des éléments de compréhension. Les résultats obtenus sont de nature quantitative (niveau des indicateurs), mais également qualitative (éléments de compréhension). Ils contribuent à l'enrichissement des livrables, mais également à l'interface avec P1. Ils peuvent être confrontés aux résultats obtenus par les retours d'expérience et représentent ainsi une entrée qui alimente le Guide thématique servant de base à P1.

Les Chapitres 3, 4 et 5 ont défini le cadre méthodologique et ses 3 phases, ainsi que les outils permettant de les mettre en œuvre. Ce cadre a concrètement été utilisé pour l'évaluation du Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP), PPC développé depuis 2011 pour apporter des réponses à l'environnement VUCA. Le Chapitre 6 présente l'évaluation de la performance de DDMRP réalisée grâce à l'utilisation du cadre méthodologique développé.

Chapitre VI

Application du cadre méthodologique pour l'évaluation de DDMRP

<u>VI-1</u>	<u>ILLUSTRATION DE P0 : CARACTÉRISATION DE DDMRP</u>	127
	VI-1.1 Sous-phase P0-1 Appropriation des concepts	127
	VI-1.2 Sous-phase P0-2 État de l'art : faire émerger les questionnements	133
	VI-1.3 Exemple de contributions de P0 aux livrables	138
	VI-1.4 Conclusion de la phase de caractérisation de DDMRP	143
<u>VI-2</u>	<u>ILLUSTRATION PHASE P1-ÉTUDE QUALITATIVE</u>	143
	VI-2.1 Exemple d'itération P1-5 Survey 88 études de cas	144
	VI-2.2 Exemples de contribution de P1-5 aux livrables	145
<u>VI-3</u>	<u>ILLUSTRATION PHASE P2-ÉTUDE QUANTITATIVE</u>	150
	VI-3.1 P2-9 POC Seuil de pic	150
	VI-3.2 Exemple de contribution de P2-9 aux livrables : participation aux analyses de D3	154
<u>VI-4</u>	<u>ILLUSTRATION DE L'UTILISATION ITÉRATIVE DU CADRE MÉTHODOLOGIQUE : LE CAS DU PLACEMENT DE BUFFER</u>	155
	VI-4.1 P0-1 appropriation des concepts : émergence de la problématique	156
	VI-4.2 P1-1 Entretiens ouverts : des heuristiques pertinentes	156
	VI-4.3 P2-2 Étude de cas industriels : des résultats contre-intuitifs	156
	VI-4.4 P1-3 Entretiens semi-directifs : un éclairage indispensable	157
	VI-4.5 P2-5 Impact du Placement de buffer : valider les hypothèses	157
<u>VI-5</u>	<u>D6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR DDMRP</u>	161
<u>CONCLUSION</u>		166

RÉSUMÉ

Le nouveau contexte industriel, caractérisé par l'acronyme VUCA (Volatilité, Incertitude, complexité et Ambiguïté), pénalise fortement les entreprises industrielles. Face aux nouvelles contraintes, il leur est parfois difficile de maintenir leur performance en utilisant les PPC traditionnels. En réponse, depuis une vingtaine d'années, de nouveaux PPC ont été proposés. Les résultats diffusés semblent intéressants, mais pour la plupart d'entre eux, nous disposons que d'une vision parcellaire de cette performance omettant la plupart du temps les conditions de réalisation de la performance et sa dimension qualitative. Nous avons donc proposé un cadre méthodologique permettant une évaluation de la performance globale des PPC.

Parmi les nouveaux PPC, DDMRP est l'un de ceux qui suscitent l'intérêt des industriels. Ce PPC a été développé par Ptak et Smith à partir de 2011.

Cette étude est l'occasion de mettre en œuvre notre cadre méthodologique afin d'évaluer objectivement DDMRP. Le Chapitre 6 présente l'utilisation qui en a été faite ainsi que les principaux résultats qui en ont découlé. Nous présenterons chaque phase dans un paragraphe indépendant. La phase P0-caractérisation, qui est le point d'entrée de la méthodologie, sera entièrement présentée afin de permettre au lecteur non initié d'acquérir les connaissances de base nécessaires à la compréhension des autres phases. Les phases P1-étude qualitative et P2-étude quantitative seront traitées à travers un exemple d'itération démontrant sa participation aux interfaces et livrables.

Nous illustrerons ensuite l'utilisation itérative du cadre méthodologique à travers l'exemple du placement des buffers. Enfin nous terminerons par la présentation complète du Délivrable D6 Conclusions et recommandations qui est la synthèse de la connaissance issue de l'utilisation de la méthodologie. Par souci de clarté, le détail des autres livrables, des outils et des plans d'expériences est consultable en [Annexe 4](#).

L'objectif du cadre méthodologique proposé est de fournir une analyse globale et objective de la performance d'un PPC à travers l'élaboration d'un rapport d'analyse qui permette de le comprendre, le positionner et l'évaluer le plus objectivement possible. L'objet de ce chapitre est de démontrer la pertinence du cadre méthodologique proposé à travers son instanciation pour l'évaluation d'un nouveau PPC : DDMRP. Ce PPC, développé par Ptak et Smith, à partir de 2011 est l'un de ceux qui suscitent l'intérêt des industriels. Le nombre d'entreprises Françaises engagées dans l'utilisation de DDMRP est particulièrement élevé et les exemples de réussite génèrent un intérêt croissant.

Dans ce contexte, l'association SPACE aero (Supply chain Progress towards Aeronautical Community Excellence) a souhaité financer une étude lui apportant une vision objective de la performance de DDMRP et de ses enjeux. SPACE aero est une association d'entreprises de l'aéronautique qui soutient, par ses actions, l'amélioration de la performance industrielle et la compétitivité au sein de la Supply Chain aéronautique. Elle compte 150 membres, elle est sponsorisée par les donneurs d'ordre tels que Airbus, MBDA, Thales ... qui en sont les membres exécutifs... Plus de 1000 actions ont été menées au sein des entreprises membres pour promouvoir la performance industrielle. Le projet de 18 mois a été nommé le projet ESCAPADD (Étude et Simulation des Contextes Aéronautiques Propices à l'Approche Demand Driven).

L'objet de ce 6^{ème} chapitre est de rendre compte de l'utilisation réelle de notre cadre méthodologique pour l'évaluation de DDMRP. Ce PPC étant relativement récent nous avons choisi d'utiliser l'ensemble des 3 phases de la méthodologie. L'étude de DDMRP a conduit à la réalisation de 18 itérations entre phases dont le détail est présenté dans le [Tableau VI-1](#) qui est le livrable D0 du rapport d'analyse. Le tableau rend compte de la démarche suivie pour l'obtention des résultats détaillés présentés dans le rapport d'analyse disponible en [Annexe 4](#).

Tableau VI-1 D0 Structuration de l'Étude cas de DDMRP

Phase	Libellé	Objectifs visés
P0-1	Appropriation des concepts	Acquisition des concepts de base
	<i>Interface P0►P1/D1</i>	Le périmètre décisionnel identifié dans la littérature correspond-il à la réalité terrain ?
	<i>Interface P0►P1/D2</i>	Quelles sont les caractéristiques des contextes industriels pour lesquels DDMRP semble pertinent ou au contraire quels sont ceux qui sont incompatibles du point de vue des entretiens experts et des utilisateurs ?
	<i>Interface P0►P2/D2</i>	Parmi les caractéristiques standard du contexte industriel et des produits, quelles sont celles qui influencent la performance ?
	<i>Interface P0►P2/D3</i>	Le placement des buffers est la 1ère étape du paramétrage, comment est-il réalisé par les entreprises ? A-t-il une influence sur la performance?
	<i>Interface P0►P1/D4</i>	Les performances annoncées sont-elles confirmées par des retours d'expériences industrielles?
	<i>Interface P0►P1/D5</i>	Aucune information n'est disponible concernant la performance qualitative
P0-2	État de l'art initial	Identification des problématiques
	<i>Interface P0►P2/D2</i>	Les contextes industriels ne sont pas étudiés
	<i>Interface P0►P2/D3</i>	Impact du placement des buffers assez peu investigué
	<i>Interface P0►P1/D5</i>	Quasiment aucun élément sur l'évaluation qualitative
P2-1	POC impact financier DDMRP	Confirmer l'intérêt de DDMRP
		Vérifier l'impact de la diminution des facteurs de variabilité et de délais sur la performance client et financière
	<i>Interface P2►P1/D4</i>	L'amélioration de l'OTD se fait-elle toujours au prix d'une augmentation du niveau de stocks?
P1-1	Entretiens ouverts	Approfondissement de la connaissance de DDMRP, Identification de points clé au sein du Guide thématique

	Interface P1-P1/D1	Le périmètre a considéré concerne non seulement le nombre de processus PPC inclus mais également le niveau de la supply chain auquel DDMRP est appliqué et son niveau de déploiement (que ce soit en termes des niveau de supply chain impliqués dans la démarche ou du nombre de références
	Interface P1►P2/D3	Le placement des buffers se fait avec les heuristiques et il vaut mieux multiplier les buffers. Est-ce que ce que tous les choix conduisent au même niveau de performance?
P1-2	Survey étude de cas documentaires	Analyse partielle sur sources docs- conclusion pas de statistique à ce stade mais besoin de plus d'études
		Études des contextes industriels
	Interface P1►P2/D4	La performance conjointe sur les 3 axes de la performance est assez peu commune. Est-ce que ce phénomène est observable par simulation ce qui signifierait qu'il y a un choix à faire ou bien est-ce une question de maturité ?
P2-2	Études de cas Industriels	Vérifier la performance de DDMRP dans un environnement plus complexe
	Interface P2►P1/D3	Le placement des buffers semble avoir une importance qu'il est difficile d'évaluer
	Interface P2►P1/D3	La taille des ordres générés par les paramètres de DDMRP semble être problématique
	Interface P2►P1/D4	les performances simulées sont médiocres comparativement à la situation actuelle des entreprises, Le paramétrage peut-il être en cause?
P1-3	Entretiens semi-directifs	Approfondissement de la compréhension
		Analyse de la performance notamment qualitative
	Interface P1►P2/D2	Le profil des produits est plus important que le contexte industriel dans le cas du choix de DDMRP mais pas de consensus sur les critères notamment en ce qui concerne le profil de la demande et la complexité
	Interface P2►P1/D3	
P2-3	POC taille de lot	Étude des tailles de lot et de leur impact
P2-4	POC lot de transfert	Impact des lots de transfert sur la performance
P2-5	Impact des buffers	Étude de l'impact du placement et du nombre des buffers
P1-4	Visites sur Site	Étude de la performance qualitative à partir des REX utilisateurs de différents niveaux
		Identification des paramètres pouvant influencer la performance
	Interfaces P1►P2/D2	Quels sont les paramètres qui influencent la performance et auxquels les entreprises doivent particulièrement être attentives ?
P1-5	Survey sur 88 études de cas	Établir des statistiques sur l'ensemble des cas industriels toutes sources confondues permettant de conclure sur les contextes industriels et sur les performances quantitatives
P2-6	Complexité de la BOM	Étudier l'impact des facteurs de complexité de la BOM sur la performance globale
P2-7	Profil de la demande	Étudier l'impact des différents paramètres de profil de la demande sur la performance globale de DDMRP
P2-8	POC Visibilité	Un DLT inférieur à la une visibilité de la demande est-il problématique ?
P2-9	POC seuil de pic	Étude de l'impact des seuils de pic
P2-10	POC lien facteur de variabilité-zone rouge-seuil de pic	Vérification de l'impact de l'abaissement du facteur de variabilité sur la zone rouge et donc sur le seuil de détection des pics (nb : détecte plus de pic = lot plus grand=saturation capacité + anticipation=augmentation stock)

Compte tenu de la densité de l'étude dédiée à DDMRP, nous présenterons, dans ce chapitre, des exemples permettant d'illustrer la démarche conduite pour l'évaluation de ce PPC. Ainsi, la 1^{ère} partie sera consacrée à PO-caractérisation. Elle sera un peu plus détaillée car elle permet l'appropriation des concepts de DDMRP l'identification de points saillants. Nous poursuivrons par l'illustration des phases P1-étude qualitative et P2-étude quantitative à travers une itération, respectivement P1-5 Survey de 88 études de cas et P2-9 POC seuil de pic. Nous développerons ensuite une illustration de l'utilisation itérative du cadre méthodologique

appliquée au cas du placement des buffers. Nous terminerons par la présentation de quelques éléments clés de la synthèse finale de cette étude extraite du livrable D6-Conclusions et recommandations.

VI-1 Illustration de P0 : caractérisation de DDMRP

Au sein du cadre méthodologique, la phase P0 est le socle qui permet de se familiariser avec le PPC en s'appropriant les concepts et faisant émerger les premiers questionnements qui seront transférés aux interfaces avec les 2 autres phases. Elle permet également son positionnement initial dans le monde des PPC. Même en présence d'un PPC connu, P0 est capitale puisqu'elle permet de formaliser les connaissances. Elle est également fondamentale car elle contribue à l'ensemble des livrables. Elle est constituée de 2 sous-phases qui sont présentées dans la suite de cette section.

VI-1.1 Sous-phase P0-1 Appropriation des concepts

Nous avons présenté brièvement le concept de DDMRP dans le [Chapitre II](#). Pour rappel, ([Ptak and Smith, 2011](#)), développent et proposent une nouvelle approche, dite Demand Driven MRP (DDMRP). Leur objectif est de s'accorder de la variabilité inhérente au contexte économique plutôt que de lutter contre elle.

D'après les auteurs, « il s'agit d'une méthode formelle de planification multi-échelon et une méthode d'exécution qui protège et promeut le flux d'information pertinente grâce à l'établissement et au management de stocks de découplage placés stratégiquement ». Il s'agit d'une méthode couplant la planification et le suivi d'atelier.

L'objectif est la maximisation du throughput, c'est-à-dire la maximisation des ventes en privilégiant le flux. Elle se détache de l'approche traditionnelle de la performance centrée principalement sur les coûts.

Comme indiqué dans la [Figure VI-1](#), la méthodologie DDMRP repose sur 5 composants qui seront décrits dans les points suivants.

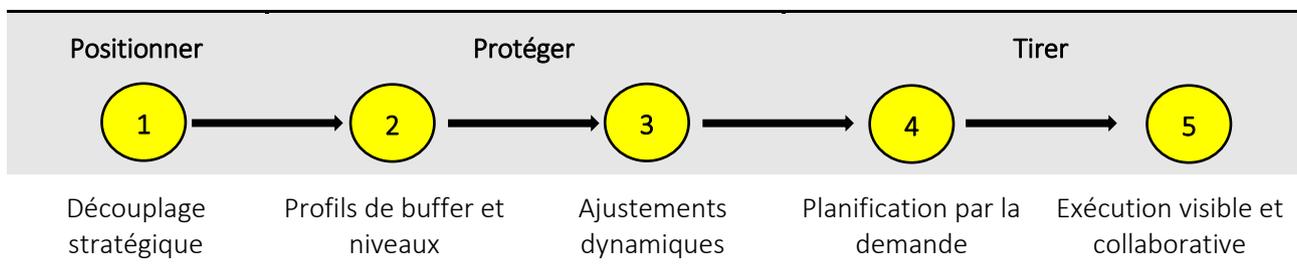


Figure VI-1 Les étapes de la méthode DDMRP d'après ([Ptak and Smith, 2011](#))

Le découplage stratégique : positionnement des buffers

Pour les auteurs, la clé de la lutte contre la variabilité est l'utilisation de points de découplage au sein de la nomenclature appelé buffers qui permettent de couper les liens de dépendance existants dans la nomenclature et donc d'éviter l'effet bullwhip.

La réflexion sur le positionnement de ces buffers est le point d'entrée pour une entreprise qui souhaite implémenter DDMRP. Ptak et Smith proposent de prendre en considération différents critères :

- Le délai de tolérance client,
- Délai de marché potentiel,
- L'horizon de visibilité de la demande,
- La variabilité externe : fournisseurs et clients,
- Préservation de la flexibilité,
- Protection d'une opération critique.

Cependant, les auteurs ne donnent pas d'indication précise sur l'impact de ce choix ni de méthode scientifique pour positionner les buffers.

Le positionnement des buffers au sein des nomenclatures permet de calculer un nouveau type de délai le Délai découplé (Decoupled Lead Time DLT). Il s'agit de la plus longue séquence de la nomenclature non protégée par un buffer. Ce délai joue un rôle majeur dans le processus de création des ordres de l'article bufferisé.

Profil de buffers et niveaux

Une fois les buffers positionnés, il faut les dimensionner. Ils sont composés de 3 zones qui possèdent chacune leur mode de calcul comme indiqué dans la [Figure VI-2](#).

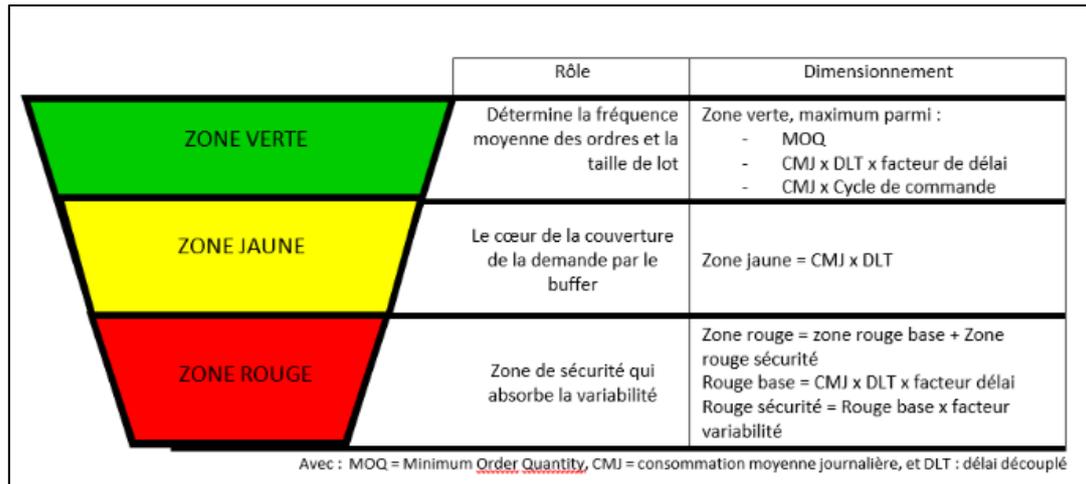


Figure VI-2 Le dimensionnement des buffers d'après Ptak et Smith 2016

Notons que la zone verte est dimensionnée à partir du résultat maximum parmi 3 calculs possibles. Les autres n'ont qu'une seule possibilité de calcul. À titre de remarque, il apparaît que 2 éléments sont pris en compte à chaque niveau à savoir : le DLT et la Consommation Moyenne Journalière (CMJ). Le DLT, qui est la plus longue séquence de la BOM de l'article non protégé par un buffer, résulte principalement du choix du placement des buffers tandis que la CMJ est une donnée commerciale, mais qui peut être influencée par le mode de calcul de la moyenne (horizon, pris en compte du passé et/ou du futur).

Ce dimensionnement résulte de la combinaison des informations propres à la référence et de celles de la catégorie de buffers à laquelle elle appartient. Au niveau de la référence, on retient les données suivantes : taille de lot (MOQ), consommation moyenne journalière (CMJ), cycle de commande et Decoupled Lead Time (DLT). Ce dernier est une innovation, les autres étant des données déjà exploitées par d'autres PPC.

Concernant la catégorie, il s'agit des coefficients de délai et de variabilité qui seront communs à toutes les références lui appartenant. Ces « coefficients de sécurité » sont un apport de DDMRP comparativement aux autres méthodes de planification qui ne les institutionnalisent pas. Dans les faits, dans les autres méthodes, des techniques plus ou moins robustes sont utilisées par les entreprises dans le but d'augmenter leur fiabilité. Ptak et Smith proposent 2 grilles (cf. [Tableau VI-2](#)) avec les plages de variation des coefficients souhaitables en fonction du niveau de délai et de variabilité. Le critère d'appréciation du délai est le DLT tandis que celui de la variabilité est le risque d'apparition de pics de demande pour les produits vendus et le risque de défaillance pour un article acheté ou fabriqué.

Tableau VI-2 Plage de choix des coefficients de délai et de variabilité d'après Ptak et Smith (2019)

Type Coefficient	Niveau	Plage de choix du coefficient
Délai	Court	61 à 100%
	Moyen	41 à 60%
	Long	20 à 40%
Variabilité	Faible	0 à 40%
	Moyenne	41 à 61%
	Forte	61 à 100%

Concernant la détermination du niveau de délai, la création des catégories se fait à partir d'une étude de la répartition des DLT par type d'articles (Acheté, Fabriqué, distribué ou produit intermédiaire). Cependant, il n'y a pas de méthode précise pour la constitution des niveaux. Les auteurs considèrent que chaque entreprise doit développer sa propre grille car la perception de la longueur d'un délai varie d'une entreprise à l'autre. Par ailleurs, notons que plus le délai est long plus le facteur de délai est petit, l'objectif est d'augmenter la fréquence des ordres plutôt que de privilégier des ordres peu fréquents, mais très importants qui vont à l'encontre de la vision flux.

La plage du coefficient de variabilité varie dans le même sens que la variabilité, l'objectif étant d'augmenter la couverture du buffer en fonction du degré de variabilité. Pour déterminer les différents niveaux du coefficient, les auteurs recommandent d'étudier le risque d'apparition de pics de la demande et la variance entre les dates prévues et réelles pour les autres.

La détermination des catégories est établie en croisant 3 éléments :

- Type de pièce : achetée, composant fabriqué, produit fini, ou article distribué,
- Catégorie de délai : long, moyen ou court,
- Catégorie de variabilité : forte, moyenne ou faible.

Cela conduit à la création de 36 familles possibles. Cependant, toutes ne seront pas utilisées par une entreprise utilisant DDMRP. Le choix doit être fait en fonction des besoins.

À chaque famille de buffers correspondra un coefficient de variabilité et un coefficient de délai définis par l'entreprise en fonction de son contexte industriel. Cela permet de massifier la gestion des paramètres et d'assurer une cohérence du paramétrage au sein de familles homogènes.

Ajustements dynamiques

Une fois le buffer positionné et dimensionné, contrairement à MRP2 classique, les paramètres de dimensionnement vont évoluer. Il existe différents types d'ajustements :

- Le recalcul des zones de buffers : ils sont basés sur le calcul de l'ADU qui permet le redimensionnement du buffer en cas de variation de la consommation, à la hausse comme à la baisse en évitant ainsi les ruptures et les surstocks. Selon Ptak et Smith, ces calculs doivent être réalisés à minima chaque semaine idéalement chaque jour.
- Les ajustements de zone : ils sont utilisés pour répondre à des besoins spécifiques des entreprises.
- Les ajustements planifiés : ils permettent de gérer les problématiques liées à des variations importantes de la demande telles que
 - o La saisonnalité,
 - o Le lancement de nouveaux produits,
 - o La fin de vie d'un produit,
 - o Des variations inattendues.

Des coefficients planifiés en fonction des évolutions prévues viennent adapter les niveaux du buffer tel que schématisé dans la [Figure VI-3](#).

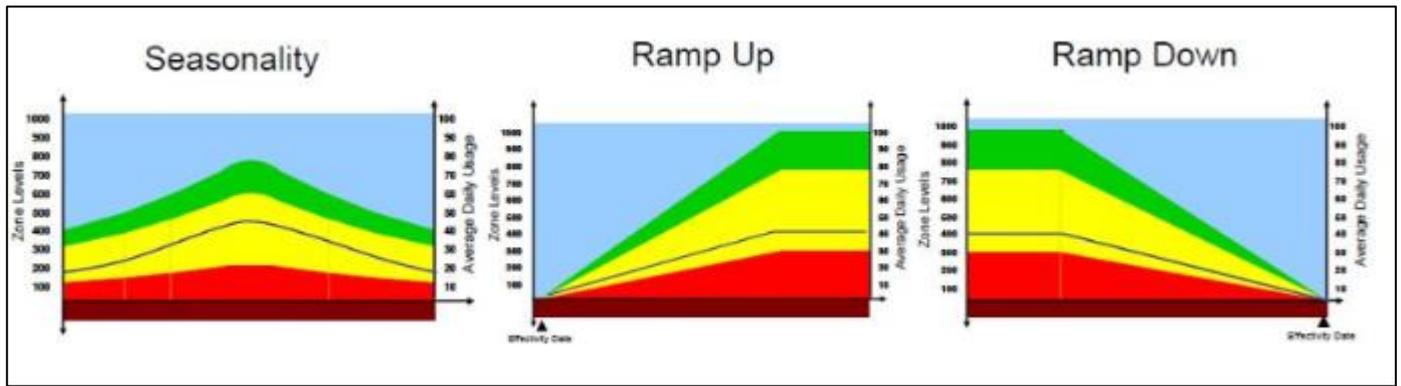


Figure VI-3 Exemple d'ajustement planifié de buffer d'après Ptak et Smith 2011

Les ajustements planifiés et de zone ne sont pas obligatoires, par contre le recalcul dynamique, quotidien ou hebdomadaire, des zones de buffers est l'un des apports de DDMRP comparativement à MRP2.

Notons que ces étapes de dimensionnement nécessitent de travailler avec une base de demande prévisionnelle normalement issue du Sales and Operations Planning quand il existe. Il serait donc abusif de dire que les prévisions ne jouent aucun rôle dans DDMRP.

Une fois les buffers positionnés et dimensionnés, la phase exploitation de DDMRP peut commencer.

Planification par la demande

Il s'agit de générer les différents types ordres des articles bufferisés, c'est-à-dire approvisionnement ou production. L'une des originalités réside dans le fait que seule la demande réelle est prise en compte dans la formule de calcul, et exclut donc les prévisions. Ptak et Smith ont nommé ce calcul : l'équation de flux disponible ou Net Flow Equation (NFE).

$$NFE = \text{Stock physique} + \text{réapprovisionnement en cours} - \text{besoins qualifiés}$$

avec

- Besoins qualifiés = retard + ordre du jour + pics qualifiés
- Pics qualifiés = sur un horizon défini (celui pris en compte des ordres réels) quantité totale d'une journée qui dépasse le seuil de détection de pic (en général = 50% zone rouge)

Pour réalisation la planification, le statut du buffer est analysé en fonction de 3 seuils

- TOR (Top du Rouge) : Rouge Base + Rouge Sécurité,
- TOJ (Top du Jaune) : TOR + zone jaune,
- TOV (Top du Vert) : TOJ + Zone verte.

Les ordres ne sont déclenchés que si $NFE \leq TOJ$ et la quantité commandée sera alors égale à $TOV - NFE$.

Une originalité majeure de DDMRP comparativement à MRP2 est le positionnement des ordres dans le temps. À chaque période, lorsque le seuil est atteint, l'ordre est positionné pour une date de fin à la date du jour plus le délai découplé de l'article. Les besoins des articles dépendants du buffer sont ensuite calculés par Backward Scheduling c'est-à-dire en remontant dans le temps jusqu'au prochain buffer qui stoppera le calcul, car il est censé comporter du stock. C'est cette procédure qui est censée assurer la protection contre la variabilité client, donc contre l'effet bullwhip, puisque les ordres sont positionnés dans le futur uniquement par existence d'une consommation réelle.

Le [Tableau VI-3](#) illustre le fonctionnement de DDMRP en ce qui concerne les calculs de lancement, le positionnement des ordres, le backward scheduling et qui en découle pour les articles dépendants. L'exemple qui est donné est celui d'un produit fini bufferisé avec une nomenclature à 3 niveaux, le dernier étant un article acheté bufferisé, pour chaque niveau le coefficient est de 1. En période 1, un client souhaite une commande de 100 pièces pour la période 11 (en violet dans le tableau). Aucune action ou décision n'est déclenchée jusqu'à la période 11. À cette période, la commande est livrée sur stock, la NFE (en bleu dans le tableau) qui

était à 950 diminue à 850 et donc en dessous du TOJ. Le dépassement de ce seuil entraîne alors le lancement d'un ordre en vue de reconstituer le stock. La quantité à lancer pour le produit fini est donc $TOV - NFE$ soit $1220 - 850 = 370$ pièces.

La DLT étant de 7 périodes, la disponibilité des pièces est prévue pour la période 18. Compte tenu du délai de fabrication de 1 période, le lancement effectif en production aura lieu en période 17. Avec le Backward Scheduling, DDMRP lance les ordres suivants pour les composants :

- en période 15 pour N1 (disponibilité en période 17),
- en période 11 pour N2 (disponibilité en période 15),
- en période 11 pour N3 (celui-ci étant bufferisé, N2 consomme N3 directement sur stock).

L'enchaînement de ces décisions est représenté dans le tableau (cases orange reliées par des flèches). En résumé, le client est servi immédiatement sur stock et DDMRP génère les ordres pour le plus bas article de la nomenclature non bufferisé (ici N2) dès la période de consommation afin de reconstituer le stock et consomme donc immédiatement le prochain composant bufferisé (ici N3, flèche rouge dans le tableau).

Tableau VI-3 Exemple de procédure de calcul des besoins avec DDMRP

Produit Fini, LT 1, DLT 7 période																		
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Demande											100							
Demande Qualifiée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
on hand_debut_période	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	850	850	850	850	850	850	850
ordre_en_cours	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	370	370	370	370	370	370	370
Stock final DDMRP	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	850	850	850	850	850	850	850	850
NFE	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	850	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
fin_Ordre_DDMRP										0	0	0	0	0	0	0	0	370
Lancement_DDMRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370
ADU	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOY	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920	920
TOG	1219	1219	1219	1219	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
TOR	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Decision	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0	0	0	0	0
Composant N1, LT 2																		
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
besoin dépendant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370
Stock_fin_de_période	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fin_MRP2			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370
Lancement_MRP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0
Composant N2, LT 4																		
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
besoin dépendant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0
Stock_fin_de_période	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fin_MRP2					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0
Lancement_MRP2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0	0	0	0	0
Composant N3, acheté bufferisé, LT 3, DLT 3																		
Période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
besoin dépendant	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0	0	0	0	0
Demande Qualifiée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	370	0	466	0	0	0	0	0
on hand_debut_période	542	542	542	542	542	542	542	542	542	542	542	172	172	172	638	638	638	638
ordre_en_cours	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	466	466	466	0	0	0	0
Stock final DDMRP	542	542	542	542	542	542	542	542	542	542	172	172	172	638	638	638	638	638
NFE	542	542	542	542	542	542	542	542	542	542	172	638	172	638	638	542	542	542
fin_Ordre_DDMRP					0	0	0	0	0	0	0	0	0	466	0	0	0	0
Lancement_DDMRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	466	0	0	0	0	0	0	0
ADU	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
TOY	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488	488
TOG	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638	638
TOR	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188
spike threshold	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188
Decision	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	466	0	0	0	0	0	0	0

Avec les mêmes données d'entrée, un fonctionnement en MRP2 sans stock de sécurité, ou avec un stock inférieur à la demande de 100, générerait un ordre d'approvisionnement de N3 dès la période 1 et l'achèvement du produit fini en période 11 pour la livraison. Cependant toute augmentation de la quantité commandée entre la période 1 et la période 11, requerrait des modifications « dans le passé » ce qui

provoquerait une rupture. En livrant sur stock, DDMRP assure que les ordres lancés le sont pour reconstituer le stock et limite les effets de la variabilité. Par ailleurs, le mode de positionnement implique que la visibilité des buffers de DDMRP ne s'étend donc pas au-delà de la DLT.

L'exemple qui est donné souligne également le fait que les ordres ne sont pas directement liés à la quantité consommée. La commande de 100 pièces engendre des ordres de 370 pièces pour les articles non bufferisés et un ordre de 466 pièces pour l'article acheté bufferisé. Sur des nomenclatures très hautes, avec plusieurs articles semi-finis bufferisés, cela pourrait être source d'effet coup de fouet. D'ailleurs, selon Ptak et Smith, il faut éviter si possible l'utilisation de tailles de lot qui amplifient cette distorsion des ordres par rapport à la demande réelle.

Exécution visible et collaborative

L'idée principale est d'objectiver la notion de priorité pour faciliter le travail des planificateurs.

DDMRP intègre des indicateurs originaux de priorisation des ordres tant au niveau du planning qu'au niveau de l'exécution au sein de l'atelier. Concernant la planification, l'indicateur est basé sur le pourcentage que représente la NFE dans le Top du vert. Plus ce pourcentage est faible, plus l'ordre est prioritaire. Une fois lancé dans l'atelier, l'indicateur suivi n'est pas la date attendue comme dans MRP2 mais le pourcentage de stock physique par rapport au stock de sécurité représenté par la zone rouge. L'utilisation d'un code couleur facilite l'identification des références problématiques d'où la notion de visibilité tandis que la collaboration repose sur le partage des informations et du mode de calculs des indicateurs.

Cette première itération, PO-1 Appropriation des concepts, de PO a permis de comprendre les principaux éléments de la théorie de DDMRP tel que présentée par ses auteurs. La 2^{ème} sous-phase PO-2 État de l'art a pour objectif de faire le point sur les thématiques de recherche.

VI-1.2 Sous-phase P0-2 État de l'art : faire émerger les questionnements

Le cadre méthodologique propose, pour cette sous-phase P0-2, de réaliser une revue de littérature systématique basée sur les recommandations de (Kitchenham, 2004) permettant d'objectiver la vision du PPC et d'établir les problématiques de recherche. Le schéma suivant synthétise les différentes étapes et précise les modalités retenues dans le cadre de l'étude de DDMRP.

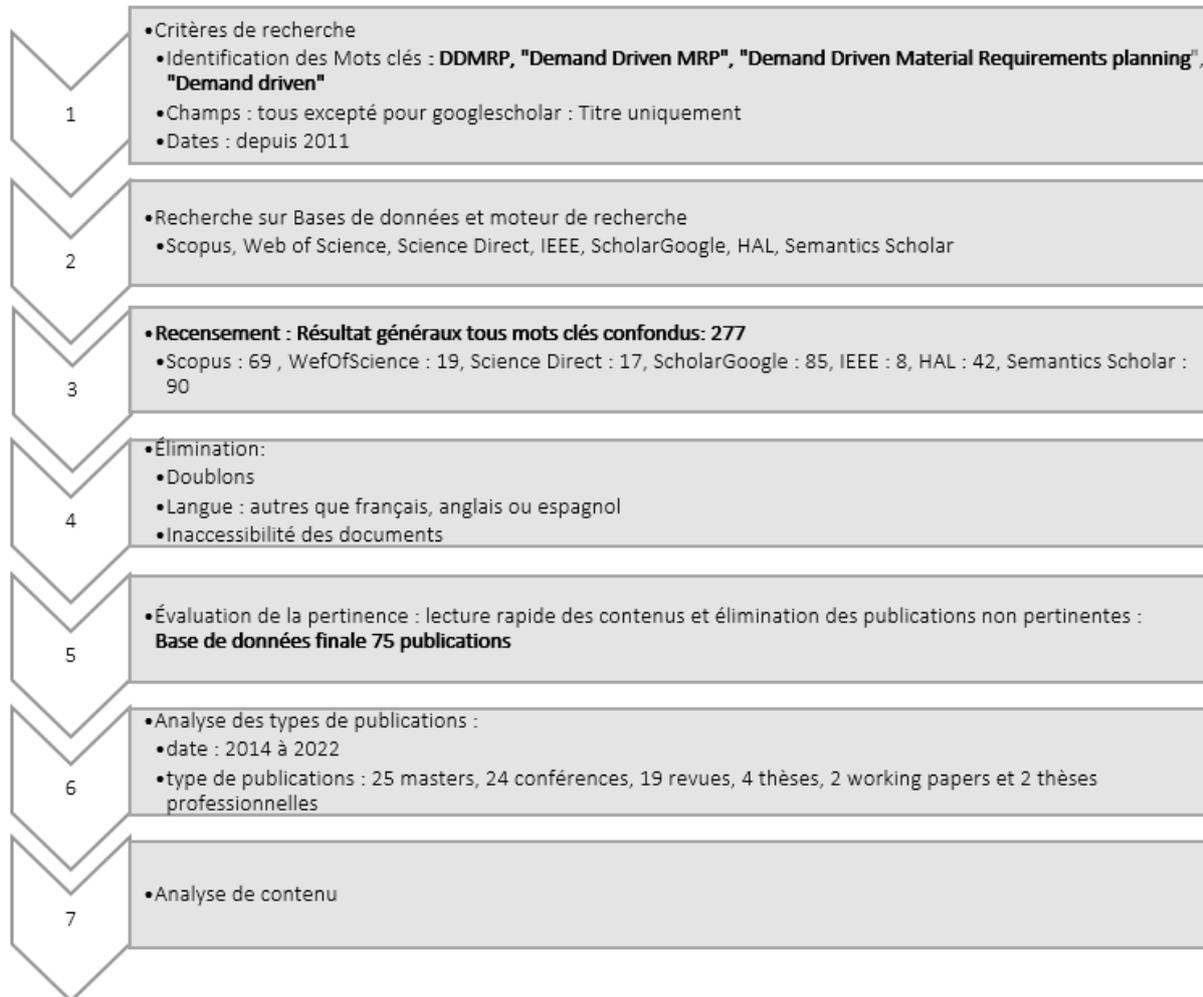


Figure VI-4 Étapes de la revue de littérature systématique appliquée à DDMRP

Comme indiqué dans la Figure VI-4, au total ce sont 75 publications qui sont analysées. La liste de ces publications est disponible en Annexe 3 .

Analyse du contenu des publications

Le contenu des publications peut être analysé en fonction de 3 caractéristiques : la thématique de recherche, la méthodologie utilisée et la vision de la performance.

Les thématiques

Les publications ont été analysées selon les thématiques PPC identifiées dans le paragraphe III-3 Détails méthodologiques de la Phase P0-Characterisation. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI-4.

Tableau VI-4 Publications DDMRP par thématiques

Thématiques	Nombre de publications	Pourcentage
comparatif autre PPC	37	49%
paramétrage	10	13%
implantation	8	11%
applicabilité	5	7%
opérationnel	5	7%
placement des buffers	5	7%
revue de littérature	3	4%
présentation générale	2	3%
Total général	75	100

Comme précisé par la méthodologie, un thème spécifique à DDMRP a été identifié, il s'agit du placement des buffers.

D'une façon générale, on constate **une surreprésentation des études liées au comparatif entre DDMRP et d'autres PPC**. À travers cette analyse, on perçoit la nature émergente de DDMRP et la démarche projet des entreprises et des chercheurs. Ils tentent de prouver l'intérêt de la méthode avant de la mettre en place et donc de considérer les autres aspects.

Dans cette optique, la justification de l'adoption de DDMRP serait directement liée à sa performance, simulée ou benchmarkée comparativement à d'autres PPC. Or, plusieurs études ont montré que les PPC doivent être liés à l'analyse stratégique et au contexte (Berry and Hill, 1992; Zäpfel and Missbauer, 1993; Fisher, 1997; Porter et al., 1999). Si plusieurs auteurs testent l'impact de variables d'environnement sur la performance de DDMRP (Martin, 2020; Miclo, 2016; Velasco Acosta et al., 2017), aucun ne présente ce type d'analyse stratégique préalable dans laquelle on considérerait un certain nombre de variables internes et externes favorables ou défavorables à l'adoption de cette nouvelle méthode. Cette remarque est également établie par (Butturi et al., 2021) qui soulignent la nécessité de mener des travaux sur l'applicabilité de DDMRP en fonction des secteurs industriels et de la complexité des organisations.

L'analyse détaillée des thématiques nous permet de comprendre les axes de recherche précis des auteurs et de situer les différents travaux. Les revues de littérature et les études conceptuelles qui sont par essence transverses sont intégrées au sein des thématiques.

a) Les études comparatives

On constate que l'écrasante majorité des travaux se penche sur des études comparatives entre la performance de DDMRP et d'autres PPC. Ce chiffre est fortement impacté par la présence de 21 rapports de master. Pour 16 d'entre eux, l'objectif est de fournir une preuve de la supériorité de DDMRP par rapport au système MRP2 en place dans l'entreprise étudiée en déployant une simulation in vivo, i.e. sur données réelles. Cette thématique reste prépondérante (43%) pour les autres types de publications.

Au sein de ce corpus, les comparaisons sont majoritairement faites avec MRP2. C'est le cas soit parce que c'est le système préexistant dans l'entreprise étudiée (Ihme and Stratton, 2015; Miclo, 2016; Shofa and Widarto, 2017; Shofa et al., 2018; Mukhlis H.F, et al., 2019; Sinha and Ubale, 2020; Bayard et al., 2020b; Bayard and Grimaud, 2018) soit parce que c'est le système le plus courant et donc le plus pertinent à évaluer (Miclo et al., 2015, 2016). L'objectif est de démontrer l'intérêt de la méthode par rapport au système classique. La quasi-totalité des publications concluent de façon positive sur les apports de DDMRP en termes de taux de service client.

On trouve cependant quelques études qui comparent DDMRP, MRP, Kanban et/ou OPT (Miclo, 2016; Miclo et al., 2018; Thüerer et al., 2020). Ce type d'études tend à définir si DDMRP obtient des performances supérieures dans l'absolu ou bien si des facteurs impactent sa performance et rendent d'autres systèmes plus performants. Ainsi (Miclo et al., 2015) démontrent que le niveau de variabilité influence l'efficacité de la

méthode de planification, mais DDMRP reste plus performant. [Thürer et al., \(2020\)](#) intègrent en plus le degré de tolérance dans la date promise au client, ainsi que la sévérité du goulet dans l'atelier. Pour ces derniers, la supériorité de DDMRP est remise en question si le goulet est changeant.

Velasco et al ([2019, 2017](#)) proposent de considérer la complexité de la BOM comme un critère de possible limitation de l'efficacité de la méthode. Ils évoquent le fait que la majorité des études comparatives menées utilisent des cas simples conduisant à s'interroger sur la généralisation des conclusions pour des environnements productifs plus complexes.

b) Le paramétrage de DDMRP

La seconde thématique dominante est liée au paramétrage, c'est-à-dire à la définition ou l'ajustement des paramètres de DDMRP qui concerne une dizaine de publications ([Bayard and Grimaud, 2018; Damand et al., 2022; G. Dessevre et al., 2019; Guillaume Dessevre et al., 2019a; Dessevre et al., 2021; Favaretto et al., 2021; Lee and Rim, 2019, 2019; Martin et al., 2019; Vidal et al., 2020](#)).

La plupart des travaux cherchent à définir de façon plus précise les différents paramètres de DDMRP. ([Favaretto et al., 2021](#)) démontrent que les heuristiques proposées par DDMRP pour fixer les principaux paramètres sont efficaces. Cependant ([Bayard and Grimaud, 2018](#)) démontrent la possibilité de diminuer de près de 20 points les facteurs de variabilité et de lead time sans dégrader la performance client tout en améliorant le niveau de stock. ([Damand et al., 2022](#)) identifient pas moins de 8 paramètres à définir.

([Lee and Rim, 2019](#)) proposent une nouvelle approche mathématique pour le dimensionnement de la zone rouge des buffers car ils constatent que la subjectivité dans le choix des paramètres de délai et de variabilité conduit à des écarts de l'ordre d'un facteur 3 pour une même référence. Les résultats obtenus montrent une supériorité de leur proposition dans tous les cas sauf pour une faible variabilité.

Les travaux de thèse de ([Martin, 2020](#)) portent quant à eux sur le contrôle dynamique des paramètres ADU, DLT et Lead Time factor. Ils établissent un arbre de décisions sur le profil statistique de la demande et la charge du goulet.

À ce stade, il apparaît donc que le paramétrage influence la performance et que des améliorations peuvent être apportées notamment en fonction du profil des produits.

c) L'implantation de DDMRP

On retrouve dans cette catégorie les études portant sur le processus d'implantation.

[McCullen and Eagle, \(2015\)](#) réalisent un retour d'expériences sur 61 cas d'implantations et interrogent 4 consultants sur les risques et opportunités de l'adoption de DDMRP. Ils concluent sur la nécessité d'un processus de diffusion standard et de formation et soulignent l'attractivité des bons résultats des entreprises s'étant lancées dans le projet précocement. Ils concluent sur le risque que représentait à l'époque l'opposition des cabinets de conseils leaders et des éditeurs de progiciel.

[Bahu et al. \(2019, 2018\)](#) cherchent à comprendre les raisons qui poussent les entreprises à lancer un projet DDMRP. Pour eux, 3 éléments ressortent : la suite logique de la théorie des contraintes utilisées par l'entreprise, des résultats prometteurs et l'apparente simplicité de la méthode.

([Dessevre et al., 2020b](#)) réalisent un retour d'expérience qualitatif sur un cas d'implantation réel ayant soulevé des questionnements. Ils répertorient ainsi les challenges pour chaque fonction logistique (approvisionnement, production et distribution) à relever dans le cadre d'un projet DDMRP. Ce travail est original d'une part par son approche qualitative et d'autre part par sa vision objective. En effet très peu de travaux abordent les limites ou défis imposés par DDMRP. Ce travail d'objectivation a été également retrouvé chez ([Butturi et al., 2021](#)) dont la revue de littérature critique relève 6 inconvénients de DDMRP : la MOQ impactant la taille des ordres, la subjectivité dans la fixation des paramètres, la nécessité de formation importante, la non applicabilité à des articles à délais importants, la dégradation du taux de service.

Enfin, la revue de littérature de ([Orue et al., 2020](#)) démontre qu'aucune publication ne traite le sujet de la standardisation du processus d'implantation de DDMRP.

d) L'applicabilité

Concernant l'applicabilité, on retrouve ici les travaux s'interrogeant sur la pertinence de DDMRP pour une entreprise donnée ou pour des contextes particuliers. DDMRP est en effet présenté comme un PPC quasiment universel. La littérature des PPC étudiée au chapitre 2 démontre cependant qu'aucun PPC ne présente ce caractère d'universalité, ce qui conduit certains auteurs à investiguer ce champ de recherche.

C'est le cas pour (Velasco Acosta et al., 2019, 2017) qui se penchent sur la question des BOM complexes et soulignent le besoin d'investigations complémentaires pour s'approcher de la réalité industrielle. (Pekarcikova et al., 2019) réalisent une preuve de concept et soulignent la difficulté d'application à des articles avec de long délai.

(Erraoui et al., 2019) travaillent également sur une preuve de concept pour la distribution mais sans présenter de résultats. Devant le peu de publications sur cette thématique (Butturi et al., 2021) relèvent le besoin de travaux supplémentaires pour définir le champ d'action de DDMRP.

e) Le placement des buffers

Paradoxalement, comme évoqué par Azzamouri et al. (2021), les recherches portant sur le placement des buffers sont assez peu évoquées : seulement 3 publications se sont penchées sur le placement des buffers à proprement parler. Rim et al., 2014 et Jiang and Rim, 2017; ont développé un modèle mathématique. Achergui et al. (2020) quant à eux proposent une heuristique pour optimiser le placement des stocks d'encours sous contrainte de minimisation des coûts de stockage.

Pourtant, le placement des buffers est la 1^{ère} étape de la méthode DDMRP et définie comme stratégie par Ptak et Smith. Ce rôle stratégique n'est que très peu évoqué par les études, seuls (Velasco Acosta et al., 2019, 2017) en font état en conclusion de leur étude. Pekarcikova et al. (2019) font remarquer qu'il n'est pas toujours possible de positionner les buffers comme identifiés dans la phase d'étude. Le fait d'avoir des délais longs au-delà de l'horizon de visibilité de la demande ne serait pas compatible avec les calculs de buffers. Il semble pertinent de considérer ce critère lors du choix de placement des buffers y compris pour les composants.

(Achergui et al., 2021) démontent l'impact environnemental du choix de positionnement de buffers dans le cadre d'une supply chain.

f) Considérations opérationnelles

Le plus souvent les auteurs qui traitent de l'utilisation de DDMRP se concentrent sur le paramétrage donc sur la phase tactique. Du point de vue opérationnel, le mécanisme de déclenchement des ordres est toujours expliqué, mais il n'y a quasiment pas d'étude sur les conséquences pour le planning et sa phase exécution.

Baptiste and Pellerin (2018) ont montré les enjeux en termes de planification à court terme et préciser l'intérêt des regroupements d'ordres. (Azzamouri et al., 2021) proposent une alternative au DDMRP classique avec un « DDMRP périodique ». Ils s'interrogent sur la fréquence d'examen du seuil de réapprovisionnement et concluent à un traitement différencié fonction de la longueur de l'intervalle entre 2 commandes. (Guillaume Dessevre et al., 2019a; Dessevre et al., 2021) traitent du paramétrage dynamique en phase d'exécution et concluent sur la nécessité de jouer sur le taux de charge en adaptant la capacité plutôt qu'en faisant varier les paramètres.

L'intégration des prévisions n'est que très peu traitée. Seuls (Johansson and Södermark, 2019) abordent directement la question. Elle peut pourtant s'avérer indispensable au-delà d'un certain horizon afin de permettre les calculs de buffers.

Les publications sur cette thématique sont relativement récentes ce qui peut témoigner d'une certaine maturité de DDMRP : les questions opérationnelles ne surviennent que lorsque le PPC est concrètement utilisé. Cependant, les questionnements ne sont pas clairement établis.

g) Synthèse

Les questions les plus traitées se concentrent sur l'intérêt de la méthode DDMRP dans une situation donnée, réelle ou in vitro, en travaillant sur la performance quantitative. Dès lors, il paraît opportun d'étudier également la performance en termes qualitatifs.

Dans les études qui cherchent à démontrer l'intérêt de DDMRP, aucune n'aborde l'analyse stratégique globale qui chercherait à identifier des environnements productifs favorables à DDMRP et les conditions de la performance. Par ailleurs, quasiment aucune étude n'aborde les limitations, il paraît donc intéressant d'étudier les conditions de réalisation de la performance.

Enfin, une dizaine d'études sont consacrées au paramétrage de DDMRP en cherchant les combinaisons permettant d'améliorer les performances en termes de service client et de niveau de stock. Cependant, aucune de ces études ne spécifie le rôle de chaque paramètre. Il paraît donc intéressant d'évaluer leurs impacts sur la performance.

Au niveau de la méthodologie employée

Le [Tableau VI-5](#) ci-dessous regroupe les méthodologies de recherches dont les résultats sont présentés dans les publications.

Tableau VI-5 Publications selon la méthodologie de recherche

	Master	Autres types	total
Étude simulateur in vitro	2	22	24
Étude simulateur in vivo	16	10	26
Étude de cas d'implantation	3	6	9
modélisation	1	8	9
quanti autre	1	2	3
enquêtes et interviews	1	1	2
survey	0	4	4
analyse conceptuelle	2	3	5
revue de littérature	0	4	4
total	26	60	86

On constate que le nombre total de publication est supérieur au nombre de publications considérées (86 contre 75). Cela correspond au fait que 9 études se prévalent d'avoir utilisé 2 méthodologies pour la plupart couplage entre simulation in-vivo et in-vitro.

Cela étant, on constate que la plupart des travaux n'ont recours qu'à une seule méthodologie. Les simulations in vitro et in vivo sont largement dominantes. Elles représentent à elles seules près de 2 tiers des techniques utilisées. Dans ces cas, l'objectif est toujours de comparer la performance sur des indicateurs quantitatifs de DDMRP soit à une situation donnée soit à un autre type de PPC. En général, les indicateurs considérés sont principalement le stock et le niveau de service. Les masters sont les principales publications fournissant des simulations données in-vivo ce qui signifie que les données utilisées sont réelles mais qu'il n'y a pas eu de mise en œuvre réelle. Seulement 9 études portent sur des cas d'implantation réelle faisant alors un comparatif des performances avant et après implantation de DDMRP.

Concernant les études couplant deux approches, on retrouve le couplage de méthodes quantitatives avec simulation in vivo et en-vitro chez [Bayard et al. \(2020a, 2020b\)](#), [Martin \(2020\)](#), [Miclo \(2016\)](#) et couplage modélisation et simulation chez [Rim et al., \(2014, 2014; Vidal et al., 2020\)](#). [McCullen and Eagle \(2015\)](#) sont les seuls à proposer un couplage de 2 méthodes qualitatives avec un survey portant sur 61 cas et des interviews de 4 experts concernant les implications de la mise en place de DDMRP.

Enfin en ce qui concerne le couplage méthodes quantitative et qualitative, 2 études seulement ont été répertoriées. En 1^{er} lieu, l'article de [Miclo et al. \(2018\)](#) s'appuie sur un survey de 11 cas et une étude simulateur in vitro avec comme objectif l'évaluation de la performance quantitative de DDMRP. En second lieu, on trouve les travaux de [Ducrot and Ahmed \(2019\)](#) qui proposent l'interview de 8 experts et un questionnaire auprès de 27 entreprises ayant utilisé DDMRP couplée avec une simulation sur données réelles pour évaluer la performance à la fois quantitative et qualitative de DDMRP.

L'étude des méthodes de recherches employées dans le cadre de l'étude de DDMRP montre que la simulation est largement dominante ce qui confirme que c'est la performance quantitative qui est la plus étudiée. De plus, seulement 2 études couplent les aspects qualitatifs et quantitatifs ce qui justifie pleinement le recours à notre cadre méthodologique pour l'évaluation de DDMRP.

Nous avons également décelé un autre type de limitations dans les simulations in vivo présentées : les comparaisons sont établies entre un système réel dysfonctionnel résultant en partie de décisions humaines et un système simulé non soumis à cette contrainte. Les améliorations calculées sont donc théoriques et les résultats à relativiser. La performance réelle de DDMRP ne peut donc être évaluée qu'à partir de cas concrets de mise en place.

La réalisation des 2 étapes de la phase P0-caractérisation, que sont l'appropriation des concepts et l'état de l'art, a ainsi permis de contribuer aux différents livrables. Nous en donnons une vision synthétique avec la présentation de D1

VI-1.3 Exemple de contributions de P0 aux livrables

Comme indiqué dans le cadre méthodologique, la phase de caractérisation doit permettre l'appropriation des concepts sous-jacents et de leur analyse primaire. Elle doit également permettre d'identifier les indicateurs clés de performance impactés par la méthode, de déterminer les premiers points à éclaircir, c'est-à-dire soulever les premières questions quant à son utilisation concrète, et de le positionner par rapport aux PPC déjà connus.

P0 contribue donc à différents livrables dans le cas de DDMRP. Les résultats présentés ne sont pas les résultats définitifs qui sont présentés en Annexe 4 et sont issus des différentes itérations mais uniquement ceux obtenus à l'issue de P0-caractérisation.

D1 Périmètre fonctionnel

L'objectif du premier livrable est d'identifier parmi les fonctions typiques du périmètre des PPC celles concernées par le PPC étudié. Ces fonctions ont été classées par niveaux décisionnels (Stratégique, Tactique ou Opérationnel). Le Chapitre 3 a établi le périmètre fonctionnel pour les principaux PPC sous la forme d'un tableau identique au [Tableau VI-6](#). Les analyses issues de P0 ont permis de compléter la matrice pour DDMRP.

Tableau VI-6 D1 Périmètre décisionnel DDMRP

Niveau de décision	Processus	DDMRP	Sources
D1-Stratégique	Détermination d'un plan de production global = charge globale		
	Détermination des ressources globales = capacité globale		
D1-Tactique	Détermination des besoins détaillés par référence		
	Détermination détaillée de la capacité		
D1-Opérationnel	Lancement des ordres de fabrication et d'approvisionnement	X	PO-1-A
	Ordonnancement,	X	PO-1-A
	Séquencement		
	Suivi des ordres	X	PO-1-A
	Suivi des ressources productives		

Phase P0-1 Appropriation des concepts

Description-Analyse

La caractérisation fait apparaître DDMRP comme un PPC essentiellement centré sur les décisions opérationnelles. Ce PPC combine 3 processus pour lesquels il propose des approches originales dont la description est proposée dans le livrable D3.

(5) le lancement des ordres,

- (6) l'ordonnancement,
 (7) suivi des ordres.

À lui seul, il ne comporte pas de processus stratégique ni tactique, mais s'appuie sur d'autres « couches » décisionnelles complémentaires au sein du modèle Demand Driven Adaptive Enterprise qui a été développé par les mêmes auteurs dans la continuité de DDMRP.

Afin de simplifier la vision proposée par les auteurs, nous proposons de représenter DDAE sous forme d'un diagramme à encastrement présenté dans la [Figure VI-5](#)

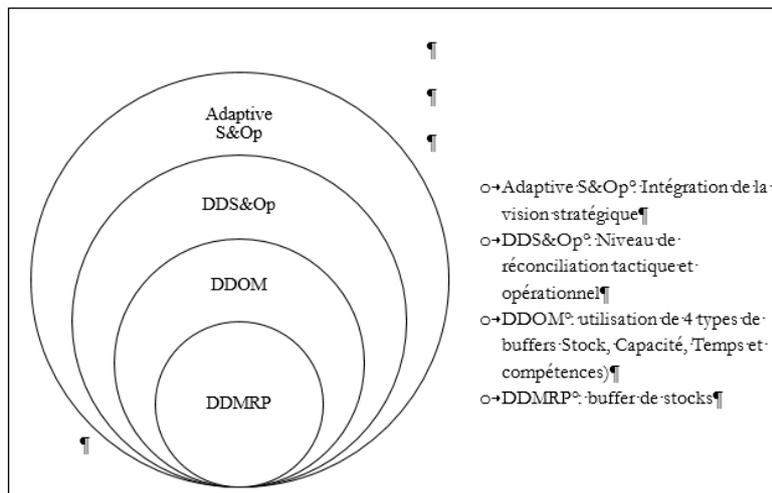


Figure VI-5 Proposition d'une vision de la méthode DDAE

Comme indiqué [Figure VI-5](#), DDMRP n'est que la 1^{ère} étape de DDAE.

Réflexions

Le périmètre de DDMRP est relativement proche de celui des PPC comme Kanban, Conwip et POLca et se veut très opérationnel. Cependant, par rapport, à MRP2, il ne présente ni couche tactique ni de couche stratégique.

L'emploi systématique du terme « Stratégique » concernant le choix de placement des buffers paraît peu adapté : le choix d'un placement de stock en tant que tel ne relève pas du niveau de décision Stratégique dès lors qu'il est réversible à moyen, voire court terme, et que les conséquences sont limitées.

En revanche, le choix de la stratégie de réponse à la demande (MTS vs MTO) est stratégique et oriente le positionnement des buffers mais ne relève pas du périmètre des PPC tel que nous l'avons identifié. Il implique en effet d'autres systèmes de l'entreprise (stratégie globale, système commercial et de distribution) et constitue un choix préalable au choix du PPC et donc à son paramétrage.

Interfaces :

P0 ► P1/D1

Le périmètre annoncé pour DDMRP est-il réellement celui utilisé par les entreprises ?

D2 Grille d'analyse des caractéristiques

P0 permet d'apporter un certain nombre d'informations sur les caractéristiques de DDMRP et de son contexte d'applicabilité. Le [Tableau VI-7](#) regroupe celles issues de la phase P0-caractérisation

Tableau VI-7 D2 Grille des caractéristiques établies pour DDMRP

	Catégories	Caractéristiques	Valeurs	Sources
D2-Caractéristiques du PPC	Caractéristiques générales /philosophie	(1) Objectif	Amélioration du stock et du taux de service , maîtrise des flux	P0-1-A
		(2) Intégration de la Variabilité	Intégrée dans le PPC par l'intégration de points de découplage censés briser l'effet coup de fouet	P0-1-A
	Génération des ordres	(3) Rôle des prévisions	Aucun	P0-1-A
		(4) Capacité	Finie	P0-1-A
		(5) Niveau de prise de décisions	Centralisé	P0-1-A
		(6) Contrôle du flux dans le planning	Time phased	P0-1-A
		(7) Modèle de gestion de stock	Continu/quantité variable	P0-1-A
	Atelier	(8) Contrôle d'atelier	Pull	P0-1-A
		(9) Système à cartes	Non	P0-1-A
(9) Système de contrôle		Priorité en fonction de la position de la NFE dans le buffer de stock	P0-1-A	
D2-Contexte industriel	Profil des entreprises	(10) Taille de l'entreprise	Toutes	P0-1-A
		(11) Secteur d'activité	Tous	P0-1-A
		(12) Mode de réponse à la demande	Tous	P0-1-A
	Process	(13) Mode de production	Toutes	P0-1-A
		(14) Organisation d'atelier	Toutes	P0-1-A
		(15) Existence de goulet	Oui	P0-1-A
	Complexité produits	(16) Hauteur	?	
		(17) Largeur	?	
		(18) Densité	?	
		(19) Nombre de produits	?	
	Demande	(20) Profil de la demande	?	
		(21) Variabilité de la demande	?	
		(22) Horizon de Visibilité	?	
(23) Volume de la demande		?		
Limitations		Aucune identifiée à ce stade	P0-1-A	

Phase P0-1-Appropriation des concepts

Description et Analyse

La Phase de caractérisation a permis de dégager l'ensemble des Caractéristiques de DDMRP :

(1) Objectif : L'objectif affiché de DDMRP : **promouvoir le flux** plutôt que les coûts. Les auteurs insistent sur les erreurs qui découlent selon eux de la focalisation sur les coûts. Ils s'appuient fortement de la Théorie des Contraintes (TOC) pour assoir les concepts théoriques sous-jacents. À titre d'exemple, ils dénoncent la mise en place de lot de production en vue de diminuer le coût de production.

(2) Intégration de la variabilité DDMRP est un PPC qui ambitionne de limiter les conséquences de la variabilité en proposant :

- De supprimer l'utilisation des prévisions dans la génération des ordres,
- D'utiliser des stocks de découplage comme réponse pragmatique
- D'intégrer systématiquement la variabilité dans le dimensionnement du système

(3) Rôle des prévisions : elles sont exclues de la méthode DDMRP

(4) Capacité : DDMRP est présenté comme un système permettant la maîtrise de la capacité grâce au stock maximum qu'il impose. Ce maximum doit garantir la faisabilité.

(5) Niveau de prise de décision : centralisé au niveau du service planification qui gère l'ensemble des informations à partir des informations remontées des autres services (logistique, production)

(6) Contrôle du flux : DDMRP est un système Time Phased qui utilise les délais de chaque référence pour les positionner dans le temps (voir D3)

(7) Modèle de gestion de stock : on peut assimiler DDMRP à un **système combinant un seuil et un niveau de rechargement, donc une date et une quantité variables.**

(8) Contrôle d'atelier : c'est une méthode de gestion de flux tirés de l'atelier puisque pilotée par la demande réelle comme pour Kanban. La demande réelle est servie sur stock et les ordres sont lancés pour reconstituer les stocks

(9) Système à cartes : non, même si le système est très visuel, il est informatisé

Concernant la description du contexte industriel pour lequel DDMRP serait pertinent, la caractérisation n'est que peu contributive.

DDMRP est présenté comme adapté à tout type de stratégie de réponse à la demande (13) et process (14 et 15) à condition de positionner et dimensionner correctement les buffers qui apparaissent comme l'une des clés de ce PPC.

Par contre, les caractéristiques de l'entreprise, de la demande et la complexité des produits ne sont pas abordés par les théoriciens de DDMRP.

Réflexions

Les besoins sont servis sur stock et non fabriquées à la demande stricto sensu. Le terme Demand Driven pourrait donc paraître galvaudé cependant, tous les ordres sont déclenchés suite à une consommation liée à la demande réelle et non pas à des prévisions.

Interfaces

P0 ► P1/D2

DDMRP semble adapté à tous les contextes industriels. Cela est-il confirmé par la réalité industrielle ? Quelles sont les caractéristiques des contextes industriels pour lesquels DDMRP semble pertinent ou au contraire quels sont ceux qui sont incompatibles du point de vue des experts et des utilisateurs ?

P0 ► P2/D2

Parmi les caractéristiques standard du contexte industriel et des produits, quelles sont celles qui influencent la performance ?

Phase P0-2- État de l'art initial

Description-Analyse

L'analyse des publications académiques démontre que seules 4 publications ont traité la question des environnements d'applicabilité de DDMRP. 3 sont des travaux préliminaires sur des cas spécifiques d'entreprises (Erraoui et al., 2019; Granda, 2017). Une étude de cas in-vitro (Pekarcikova et al., 2019) s'interroge en conclusion sur l'applicabilité à des produits à délais longs et la dernière (Velasco Acosta et al., 2019) traite de complexité de l'organisation industrielle.

La conclusion, de cette Phase P0-2, est l'absence d'information concernant les caractéristiques du contexte industriel au sein des publications académiques ce qui confirme les conclusions de la revue de littérature de (Butturi et al., 2021)

Réflexions

L'absence de travaux sur les caractéristiques du contexte productif peut être due à la relative jeunesse de DDMRP. Le manque de cas réels n'a pas encore permis d'établir des statistiques pouvant alimenter la réflexion.

Interfaces

P1 ► P2/D2

Les contextes industriels ne sont pas vraiment étudiés. Plusieurs publications concluent sur la nécessité d'investiguer DDMRP sur des environnements plus complexes. DDMRP est-il vraiment adapté à tous les contextes industriels ?

D4 Analyse des indicateurs

La phase P0 a également permis de relever les niveaux de performance présentés dans le [Tableau VI-8](#)

Tableau VI-8 D4 analyse des indicateurs DDMRP suite à P0

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée dans l'industrie (Phase0)	
		Médiane	MAX
Performance client	Taux de service	+17%	+45%
	Profondeur du retard	NC	NC
Performance du système industriel	Taux de charge :	NC	NC
	Temps de traversée	-60%	-85%
Performance financière	Niveau total des stocks et en-cours	-26%	-54%
	Pourcentage des en-cours	NC	NC

Phase P0-1 Appropriation des concepts

Description-Analyse

Le Demand Drivent Institute communique officiellement sur son site internet sur 3 aspects de la performance : la performance client mesurée avec l'OTD (1), la performance industrielle avec le Lead Time et la performance financière mesurée par le niveau de stock (2). Les chiffres présentés sont ceux de l'industrie manufacturière compte tenu de notre sujet d'étude à savoir les PPC.

Les améliorations sont particulièrement spectaculaires concernant la réduction des lead Times.

Réflexions

La question du biais de communication se pose nécessairement lorsque l'on utilise les données d'un site commercial. Les chiffres annoncés sont issus d'une étude menée par un Cabinet conseil sur 68 entreprises mais aucune précision n'est donnée sur la technique d'échantillonnage : s'agit-il de clients ? d'entreprises représentatives ? Il est fondamental de pouvoir recouper ces informations avec des expériences réelles pour confirmer ces excellents résultats.

Interfaces :

P0 ► P1/D4

Les performances annoncées sont-elles confirmées par des expériences industrielles ?

La Phase P0-caractérisation de DDMRP a permis de contribuer aux 5 livrables et alimente D6-conclusions et recommandations. Les principaux résultats intermédiaires ont été présentés, les résultats complets sont présentés en Annexe 4 et sont issus des itérations permises par le traitement des questions posées dans les interfaces.

VI-1.4 Conclusion de la phase de caractérisation de DDMRP

Au terme de la phase de caractérisation, il apparaît que DDMRP est un PPC original qui propose de nouveaux outils et semblent donner des résultats prometteurs dans les entreprises utilisatrices. Cependant, l'étude des concepts et de la littérature conduisent à soulever plusieurs questions dont nous avons fait état dans les interfaces. Nous pouvons les regrouper en 4 questions majeures concernant DDMRP.

Q1 Le contexte industriel

Les résultats quantitatifs annoncés semblent prometteurs, mais, dans le cadre de l'évaluation globale de la performance, demandent à être objectivés et complétés. Du point de vue du contexte industriel, l'État de l'art du chapitre 2 a mis en évidence que les PPC doivent être adaptés aux caractéristiques de l'environnement industriel.

Or, l'étude de la littérature dédiée à DDMRP ne fait mention d'aucune limitation quant au cadre de son utilisation. Les Phases P1 et P2 devront donc s'attacher à préciser les contextes industriels favorables ou réhibitoires pour l'utilisation de DDMRP.

Q2 Confirmation de la performance quantitative

Il s'agit d'objectiver la performance annoncée. Les indicateurs annoncés sont-ils retrouvés dans les cas de mise en place réelles ? D'autres indicateurs sont-ils impactés ?

Les deux autres phases devront permettre de répondre à cette question.

Q3 L'évaluation de la performance qualitative

P0-caractérisation n'a pas permis de relever que peu d'éléments d'évaluation qualitative probants alimentant le dérivable D4 Analyse Bénéfices/Risques. L'accent est mis sur les indicateurs quantitatifs de performance. La question des impacts de l'utilisation de DDMRP par les équipes de planification et par les ouvriers peut se poser.

Ce type d'information ne peut être récolté que sur la base d'études de cas réels ou sur des retours d'expériences. Sur cette thématique, c'est donc essentiellement la phase P1 qui pourra apporter des réponses à cette question.

Q4 le placement des buffers : le placement des buffers a-t-il une influence sur la performance de DDMRP ?

Il est présenté comme stratégique et des heuristiques sont proposées pour guider les utilisateurs dans les choix. Il est indiqué que les buffers sur produits finis doivent être choisis pour se protéger de la variabilité client, les buffers de semi-finis pour protéger les goulets et les buffers de composants achetés pour limiter la variabilité fournisseurs. Cependant, nous ne disposons pas d'information concernant l'influence réelle de ce choix sur la performance quantitative.

Cette question pourra être soumise aux 2 autres Phases :

- P1 pourra permettre d'interroger experts et praticiens pour déterminer la méthode employée pour le placement des buffers.
- P2 permettra d'évaluer l'impact du placement des buffers sur la performance.

Ce 1^{er} paragraphe a permis de présenter globalement DDMRP et d'illustrer l'utilisation de P0 et sa contribution aux dérivables. Les analyses ont pointé 4 questions centrales concernant DDMRP qui seront traitées dans l'étude. Le paragraphe suivant est consacré à l'illustration de la P1 pour DDMRP.

VI-2 Illustration Phase P1-étude qualitative

L'ordre de traitement entre les 2 phases n'est pas défini par le cadre méthodologique. Cependant, étant données les performances annoncées, le choix a été fait dans le cadre de l'Étude ESCAPADD de poursuivre le

travail en commençant par P1 afin de confronter les résultats annoncés aux retours d'expérience terrain. L'objectif était d'établir un benchmark de la performance sur les cas existants afin de valider ou non l'intérêt de DDMRP pour la filière aéronautique.

Nous présentons donc d'abord cette phase. Le cadre méthodologique étant itératif, nous ne présentons qu'une illustration de l'utilisation de P1 et choisissons, après avoir rappelé les objectifs, de ne présenter que l'itération P1-5 Survey de 88 étude de cas. Cet exemple se focalise sur le contexte industriel et l'objectivation de la performance quantitative.

VI-2.1 Exemple d'itération P1-5 Survey 88 études de cas

Compte tenu de la nature itérative du cadre méthodologique proposé, la phase P1 Étude qualitative pour l'évaluation de DDMRP est en réalité constituée de plusieurs itérations. Nous ne présentons ici que la sous-phase P1-5 Survey 88 études de cas qui représente l'étude de la base de données des cas réels réalisée grâce à l'ensemble des sources mobilisées.

Cette itération répond à plusieurs interfaces :

Interface P0►P1/D2 : DDMP semble adapté à tous les contextes, est-ce que des contextes industriels semblent particulièrement pertinents pour DDMRP ?

Interface P0►P1/D4 : Les performances annoncées sont-elles confirmées par des retours d'expériences industrielles ?

Le cadre méthodologique propose une structure pour la base de données utilisée pour le P1-5 et qui a été alimentée par les autres sources. L'ensemble des sources utilisées dans la phase P1 a permis de constituer **une base de données regroupant 88 cas d'entreprises utilisatrices** présentés dans le [Tableau VI-9](#) dont certains ont été évoqués par plusieurs sources différentes. Notons que 4 entreprises issues des travaux ([Bahu et al., 2019](#)) sont anonymes.

Tableau VI-9 Base de données des cas industriels d'utilisation de DDMRP

Entreprise	Secteur	Pays	Taille	Environnement	Fonction	Processus	NB
9Wood	BTP/matériaux construction	Usa	PME	MTO	A-P-D	continu	1
ABE construction chemicals	BTP/matériaux construction	Sa	GE	MTS-MTO	A-P-D	continu	2
Acesco	Métallurgie	Colombie	GE	MTS 85% MTO 15%	A-P-D	continu	1
Air Liquide	Chimie/parachimie					continu	2
Airbus	Industrie aéronautique	France	GE	MTO	P	discret	1
Albea	Fabrication de produits en caoutchouc et en plastique	France	GE	MTS	A-D	continu	1
Allergan	Industrie pharmaceutique	Usa	ETI	MTS	A-P-D	continu	3
Amore Pacific Corporation	Produits De grande Consommation	Corée	GE	MTF	A	continu	1
ArcelorMittal Brazil	Métallurgie	Brésil	GE	MTS	D	continu	1
Arkopharma	Industrie pharmaceutique	France	ETI	MTS	A-P	continu	2
Avigilon	Industrie électrique et électronique	Usa	ETI	MTS	P	discret	3
Bernard CONTROL	Industrie électrique et électronique	France	ETI	MTS-MTO	P-D	discret	2
Biomérieux	Autres industries	France	GE	MTO	A-P-D	discret	4
BRITISH TELECOM	Industrie électrique et électronique	Gb	GE	MTS	A-P-D	discret	3
BSH	Biens d'équipement	Allemagne	GE	MTS	A-D	discret	1
Ceramfix	BTP/matériaux construction	Brésil	ETI	MTS	A-P-D	continu	1
Coasa	Industrie aéronautique	Espagne	ETI	MTS	A-P	discret	3
CocaCola Beverages Africa	Embouteillage	Afrique du Sud	GE	MTF	A-D	continu	2
copreci	Industrie électrique et électronique	Espagne	ETI	MTS	A	discret	2
Crylor	Métallurgie	France	PME	MTO/ETO	A-P	continu	2
CS1	Produits de grande consommation	Espagne	NR	MTS	D	distribution	1
CS1 (cf. Kortabarria et al 2019) et CS2 de la thèse 2018	Autres industries	Espagne	NR	MTS	A	discret	1
CS3 Kortabarria	Industrie auto	Espagne	NR	MTS	A-P-D	discret	1
Domus Line	Industrie électrique et électronique	Italie	ETI		NR	discret	1
Eminess Technologies	Autres industries	Usa	PME	NR	A	discret	1
EMKA	Industrie électrique et électronique	France	ETI	MTS-MTO	D	discret	1
Entreprise 1	Autres industries	France	ETI	MTS-MTO	A-P	discret	1
Entreprise 2	Industrie électrique et électronique	France	PME	MTS-MTO	P-D	discret	1
Entreprise 3	Autres industries	France	ETI	MTO	P	discret	1
Entreprise 4	Industrie électrique et électronique	France	ETI	MTS	A-P	discret	1
Erreka Automatismos	Biens d'équipement	Espagne	PME	MTS	NR	discret	1
Étude de cas de Mukhlis et al	Industrie agroalimentaire	Nr	NR	MTS	NR	continu	1

Fagor Industrial	Biens d'équipement	Espagne	PME	MTS	NR	discret	1
Figeac Aero	Métallurgie	France	ETI	ATO	A-P-D	discret	3
FINSA	BTP/matériaux construction	Espagne	ETI	MTS-MTO	A-P-D	continu	1
Forge USA	Métallurgie	Usa	PME	MTO	P-D	continu	3
Frulact	Industrie agroalimentaire	Espagne	ETI	MTS-MTO	A-P	continu	1
Guardian Automotive	Industrie auto	Espagne	PME	MTS	A-P-D	continu	1
Haceb	Biens d'équipement	Colombie	GE	MTS	A-P	discret	2
IFAM	Autres industries	Espagne	PME	MTS-MTO	A	discret	3
INDAUX	Autres industries	Espagne	ETI	MTS	A-P	discret	2
Ingelec	Industrie électrique et électronique	Maroc	ETI	MTS	NR	discret	1
ISEO	Produits de grande consommation	Italie	ETI	MTS	A-P-D	discret	1
IZAR	Métallurgie	Espagne	ETI	MTS-MTO	A-P	continu	1
Jamestown	Cartonnerie	Usa	PME	MTO	D	continu	1
Kormotech	Industrie agroalimentaire	Ua	ETI	MTS	A-P-D	continu	1
Lectra	Biens d'équipement	France	ETI	MTO	A-p	discret	1
LGI	Travaux d'impression	Usa	PME	MTS-MTO	P-D	discret	2
Liban Cables SAL	Industrie électrique et électronique	Liban	ETI	MTS et MTO	D	continu	1
Lider Cortinas y ambientes	Biens d'équipement	Colombie	PME	NR	NR	discret	1
Lightspeed Technologies	Industrie électrique et électronique	Usa	NR	MTS	A-P	discret	1
Mann & Hummel	Biens d'équipement	Allemagne	GE	NR	NR	discret	1
Miansai	Produits de grande consommation	Usa	PME	MTO	A	discret	1
Miba Bearing	Métallurgie	Usa	ETI	MTO	P	continu	2
MIC	Textile/habillement	Colombie	GE	MTS	A-P-D	discret	3
Michelin Automobile	Fabrication de produits en caoutchouc et en plastique	France	GE	MTS	A-P	discret	6
Monomax	Industrie agroalimentaire	Ukraine	ETI	MTS 20% MTO 80%	NR	NR	2
MOOG	Industrie aéronautique	Gb	GE	MTO	A-P-D	discret	2
NLMK	Métallurgie	Russie	GE	MTS	D	continu	1
Oregon Freeze Dry	Chimie/parachimie	Usa	ETI	MTS	A-P-D	continu	2
Perma-Pipe	Métallurgie	Usa	ETI	MTO	D	continu	2
Peugeot Saveur	Autres industries	France	PME	MTS	A-P-D	continu	2
Pierre Fabre	Industrie pharmaceutique	France	GE	MTS	A-P-D	continu	2
Pilatos	Distribution	Colombie	NR	DISTRIBUTION	D	distribution	1
Postes del Norte	BTP/matériaux construction	Pérou	PME	MTS	NR	continu	1
Productos Tubulares	Métallurgie	Espagne	ETI	MTS-MTO	D	continu	3
Protea Chemincals	Chimie/parachimie	Afrique Du Sud	GE	MTS	D	continu	1
PZ CUSSONS	Produits de grande consommation	Gb	GE	MTS	A-P	continu	2
Rex Materials Group	Autres industries	Usa	ETI	MTO	A-P-D	discret	1
Romac Métallurgie	Métallurgie	Usa	ETI	MTS-MTO	A-P	continu	2
Roseburg Forest Products	BTP/matériaux construction	Usa	ETI	MTS	A-P-D	continu	1
Royal Engineered Composites	Métallurgie	Usa	PME	MTO	A-P	continu	2
Sames Kremlin	Autres industries	France	ETI	MTS-MTO	A-P-D	discret	3
Satuerca	Métallurgie	Espagne	PME	MTS	P-D	continu	3
Shell	Chimie/parachimie	Gb	GE	MTS	A-P-D	continu	2
SLN (Eramet)	Métallurgie	France	ETI	MTS-MTO	A-P	continu	1
stannah	Biens d'équipement	Gb	ETI	MTO	NR	discret	1
StemCell Technologies	Industrie pharmaceutique	Usa	ETI	MTS	A-P	continu	2
Straumann	Autres industries	Suisse	GE	NR	P-D	discret	1
ThyssenKrup Aerospace	Industrie aéronautique	Gb	GE	MTO	NR	continu	1
Tube forging of america	Métallurgie	Usa	PME	MTO	NR	continu	1
Unilever	Produits de grande consommation	Usa	GE	MTS	A-P-D	continu	1
Vajillas Corona	Produits de grande consommation	Colombie		Mts	A-P-D	continu	1
VICRILA	Autres industries	Espagne	ETI	MTS-MTO	A-P	discret	1
Weser	BTP/matériaux construction	France	PME	MTS	P-D	continu	2
Wieland Metal service	Métallurgie	Usa	PME	MTS	NR	discret	1
Wipaire	Industrie aéronautique	Usa	PME	MTO	A-P	discret	1
Yuko	Chimie/parachimie	Ukraine	ETI	MTS	NR	continu	1

Avec PME petites et moyennes entreprises, ETI entreprise de taille intermédiaire et GE = grande entreprise

Mts = make to stock, mto = make to order, ato = assemble to order, a = approvisionnement, p = production et d = distribution

L'analyse des données réalisée sur les 88 cas d'implantation de DDMRP a contribué à 2 livrables.

VI-2.2 Exemples de contribution de P1-5 aux livrables

Impact de P1-5 sur D2 Grille d'analyse des caractéristiques

Les analyses menées sur la base de données permettent de définir les caractéristiques des entreprises utilisatrices de DDMRP. Elles ont permis de renseigner partiellement D2. Le détail est présenté dans le [Tableau VI-10](#).

Tableau VI-10 Exemple d'impact de l'itération P1-5 sur D2

	Catégories	Caractéristiques	Valeurs	source
D2-Caractéristiques du PPC	Caractéristiques générales /philosophie	(1) Objectif	Baisse du stock et augmentation du taux de service , maîtrise des flux	P1-2-A, P1-5-C
		(2) Intégration de la Variabilité	Intégrée dans le PPC par l'intégration de points de découplage censés briser l'effet coup de fouet	
	Génération des ordres	(3) Rôle des prévisions	Aucun	
		(4) Capacité	Finie	
		(5) Niveau de prise de décisions	Centralisé	
		(6) Contrôle du flux dans le planning	Time phased	
		(7) Modèle de gestion de stock	Continu/quantité variable	
	Atelier	(8) Contrôle d'atelier	Pull	
		(9) Système à cartes	Non	
(9) Système de contrôle		Priorité en fonction de la position de la NFE dans le buffer de stock		
D2-Contexte industriel	Profil des entreprises	(10) Taille de l'entreprise	Sans influence	P1-2-A, P1-5-C
		(11) Secteur d'activité	Sans influence	P1-2-A, P1-5-C
		(12) Mode de réponse à la demande	Dépend du placement des buffers, compatible MTS, MTO et ATO Pas pour les systèmes ETO	P1-2-A, P1-5-C
	Process	(13) Mode de production	Discret ou continu (dépend du placement des buffers)	P1-5-C
		(14) Organisation d'atelier	Sans importance lié au placement de buffer	
		(15) Existence de goulet	Oui, mais intégré dans DDOM	
	Complexité produits	(16) Hauteur		
		(17) Largeur		
		(18) Densité		
		(19) Nombre de produits		
	Demande	(20) Profil de la demande		
		(21) Variabilité de la demande		
		(22) Horizon de Visibilité		
		(23) Volume de la demande		
Limitations		ETO peu pertinent	P1-5-C	

La taille (10)

Le classement établi se base uniquement sur le nombre d'employés au sens de l'INSEE et exclut donc les critères de chiffres d'affaires dont nous ne disposons pas. La taille est appréciée à l'échelle du groupe à laquelle appartient l'entreprise ayant déployé la méthode. Cela ne signifie pas que le groupe dans son ensemble a adopté la méthode. Notons que pour 6 cas, les auteurs n'ont pas précisé le critère taille.

Tableau VI-11 Répartition des cas industriels par taille

Taille	Nombre d'Entreprises
--------	----------------------

ETI	40%
GE	28%
NR	7%
PME	25%
Total général	100

D'après [Tableau VI-11](#), Les ETI (Entreprises de Taille Intermédiaire) qui comprennent entre 250 et 4999 salariés représentent près de 40% de l'échantillon. Elles dominent, mais les grandes entreprises (GE) et les PME sont quasiment représentées à parts égales. Concernant les PME (moins de 250 salariés), il s'agit essentiellement d'entreprises ayant dépassé la centaine d'employés. L'étude n'a retrouvé qu'un seul cas de mis en place en entreprise de moins de 50 salariés, mais il s'agissait d'un site appartenant à un petit groupe qui n'annonce pas sa taille réelle. Cela pose la question de l'accessibilité de la méthode pour les TPE : est-ce que la taille de l'entreprise est un frein en soi ou plutôt un problème de moyens et/ou de maturité ? Il se pourrait également que les petites entreprises ne communiquent pas sur leur projet en cours.

Le secteur d'activité (11)

D'après la phase PO-1, le système DDMRP semble plutôt prévu pour l'industrie avec phase d'assemblage étant donné qu'il est question de points de découplage qui s'intègre particulièrement bien dans les industries avec des sous-ensembles.

Si ce type d'industrie est majoritaire des cas d'implantation, DDMRP est en réalité largement adopté par d'autres secteurs. D'après le [Tableau VI-12](#), on retrouve en effet près de 30% d'industries de transformation (chimie et matériaux), mais également des cas dans la distribution ou les produits de grande consommation ou encore dans l'industrie pharmaceutique.

Dès lors, le critère secteur d'activité semble peu pertinent pour définir le profil type d'entreprises DDMRP.

Tableau VI-12 Répartition des cas d'implantation des cas DDMRP par secteur d'activité

Secteur d'activité	Pourcentage d'entreprises
Autres industries	14%
Métallurgie	18%
Industrie électrique et électronique	13%
Biens d'équipement	9%
BTP/matériaux construction	8%
Produits de grande consommation	8%
Chimie/parachimie	6%
Industrie aéronautique	6%
Industrie agroalimentaire	5%
Industrie pharmaceutique	5%
Industrie automobile	2%
Fabrication de produits en caoutchouc et en plastique	2%
Cartonnerie	1%
Distribution	1%
Embouteillage	1%
Textile/habillement	1%
Travaux d'impression	1%

Total général	100
---------------	-----

Mode de réponse à la demande (12)

À l'issue du chapitre 2, nous avons retenu 2 stratégies extrêmes de réponse à la demande Make to Stock (MTS) vs Make to Order (MTO) ainsi qu'un certain nombre d'alternatives basées sur le positionnement du point de découplage.

D'après PO-1 Analyse des concepts, il paraît probable de trouver une majorité de cas dans les alternatives. L'analyse des cas d'implantation (cf. [Tableau VI-13](#)) amène pourtant une vision différente.

Tableau VI-13 Répartition des cas DDMRP selon le mode de réponse à la demande

Mode de réponse à la demande	Pourcentage de cas
MTS	49%
MTO	19%
MTS-MTO	17%
NR	6%
MTS et MTO	3%
MTF	2%
DISTRIBUTION	1%
ATO	1%
MTO/ETO	1%
Total général	100,00%

D'après le [Tableau VI-13](#), On constate que 49% des entreprises sont déclarées comme étant MTS mais décrites comme MTF c'est-à-dire basées sur des prévisions. Le MTO est sous représenté avec seulement 17 entreprises soit 19%. Notons que les cas MTS-MTO correspondent en réalité, d'après les informations recueillies, à des systèmes ATO avec une partie en flux poussé et une partie en flux tiré ce qui porterait le pourcentage de cas ATO à 18%, également sous-représentés. 3 entreprises expliquent gérer des flux mixtes c'est-à-dire une partie totalement en MTS et une partie totalement en MTO. Enfin, il n'existe aucun cas ETO.

En conséquence, le critère, stratégie de réponse à la demande ne paraît pas pertinent pour déterminer l'intérêt de la méthode DDMRP pour une entreprise

Type de process (13)

Comme indiqué dans le [Tableau VI-14](#), l'étude des cas DDMRP montre qu'il existe autant de mises en application de DDMRP dans les process discrets que continus, mais aucun dans les modes projet. Ce constat est cohérent par rapport aux utilisations des PPC traditionnels qui s'appliquent rarement au mode projet.

Tableau VI-14 Répartition des cas DDMRP selon le type de process

Type de process	Pourcentage de cas
processus discret	47%
processus continu	49%
distribution	3%
NR	1%
Total général	100%

Cependant, DDMRP étant initialement une méthode qui vise à instaurer des stocks de découplage au sein d'un processus de production, elle s'adresserait, a priori, aux systèmes gérant des stocks intermédiaires et non aux systèmes continus. Le fait de trouver quasiment 50% de cas dans Process Continu est donc plus surprenant.

D'après l'étude menée sur l'échantillon, il apparaît qu'il n'existe pas de profil type de l'entreprise adoptant DDMRP. Le placement des buffers permet a priori à DDMRP de s'adapter aux différentes stratégies de réponse à la demande (depuis MTO vers MTS). Les seuls environnements qui ont été écartés sont ceux liés à l'organisation projet et donc également au mode ETO.

Le constat de l'absence de TPE pose la question de la pertinence de DDMRP pour elles ou bien d'une potentielle absence de communication sur des projets en cours.

Impact de P1-5 sur D4-Analyse des indicateurs

Les résultats indiqués dans le [Tableau VI-15](#) de synthèse sont ceux issus de l'analyse des cas recensés dans P1-5 présentant des résultats chiffrés.

Tableau VI-15 D4 Analyse des indicateurs à l'issue de P1-5

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée (Phase0)		Performance in vivo (Phase1)	
		Médiane	MAX	Médiane	MAX
Performance client	(1) OTD	+17%	+45%	+15 pts (P1-5-A)	+50pts (P1-5-A)
	(2) Profondeur du retard	NC	NC	Réduction non quantifiée (P1-5-A)	
Performance du système industriel	(3) Taux de charge :	NC	NC		
	(4) Lead time	-60%	-85%	-50% (P1-5-A)	-85% (P1-5-A)
Performance financière	(5) stock total	-26%	-54%	-28 pts (P1-5-A)	-60pts (P1-5-A)
	(6) Pourcentage des en-cours	NC	NC	Réduction non quantifiée (P1-5-A)	

L'ensemble des analyses présentées dans la suite de ce paragraphe est basé sur les chiffres présentés dans le [Tableau VI-15](#).

OTD (1)

Concernant l'OTD, 27 entreprises font état d'une amélioration avec un gain moyen de +24pts, un maximum à +50pts une médiane à +15 points. Ces chiffres sont globalement conformes à ceux annoncés par le DDI pour le secteur Industrie. Ce gain important peut être expliqué par le fait que pour un certain nombre d'entreprises le facteur déclenchant la démarche DDMRP est la faiblesse du taux de service client. 3 entreprises sont stables à 100% et 2 entreprises n'ont constaté aucun changement. La très grande majorité 61% n'évoquent pas l'OTD dans leurs résultats.

Lead Times (2)

La réduction du Lead Time n'est évoquée que par 21 entreprises sur 88 avec des réductions moyenne et médiane de 50% et un maximum à 85% sur les 17 donnant les chiffres.

Sur cet indicateur, la médiane constatée est inférieure de 10 points à celle annoncée par le DDI (-60%). Lors de nos échanges avec les experts (P1-3) et lors des visites (P1-4), nous avons pu identifier un amalgame entre 2 définitions du Lead Time à savoir le temps de réponse au client et le temps de traversée.

Dans le 1^{er} cas, le placement du buffer peut effectivement avoir un impact majeur puisqu'il peut permettre de servir le client sur stock ou de commencer la finition du produit à partir d'un buffer de produits semi-finis à réception de la commande ferme. La compression du Lead Time est immédiate dans ce cas mais conditionnée au placement du buffer. Cette vision explique l'amélioration considérable de cet indicateur.

Quant au temps de traversée, qui est le temps écoulé entre le lancement de l'ordre de fabrication et la mise à disposition du produit fini (en stock ou au client), il pourrait être pénalisé par la mise en place de buffers intermédiaires qui augmente le temps de séjour dans l'atelier. Cela étant, 2 entreprises nous ont rapporté une baisse réelle des temps de traversée due à la libération de capacité productive permise par la méthode DDMRP. Pour elles, en s'affranchissant des tailles de lots non nécessaires, elles ne lancent que les quantités strictement nécessaires pour servir les commandes client. De ce fait, elles ont réussi à réduire les en-cours (6) et à améliorer les temps de traversée.

Stock total (5)

Tableau VI-16 Répartition des cas concernant le niveau de stock

Évolution du stock	Pourcentage de
Réduction quantifiée	50%
réduction non quantifiée	5%
Situation mitigée	3%
stable	3%
augmentation non quantifiée	2%
NR	36%
Total	100%

En ce qui concerne l'amélioration des stocks (cf. [Tableau VI-16](#)), les résultats sont davantage communiqués : 55% des entreprises constatent une amélioration. 50% des entreprises annoncent un résultat chiffré allant de -1,8 à -60% de stocks avec une moyenne -28,5% et une médiane à -28%, légèrement supérieure à celle annoncée par le DDI. Le Best in Class atteint une amélioration de -60 points soit 6 points au-dessus des chiffres communiqués.

L'absence de communication sur plus d'un tiers des cas pose question d'autant que d'autres itérations ont montré des phénomènes d'augmentation des stocks (P2-1 Impact financier de DDMRP, P2-2 Étude de cas industriels et P1-3 Entretien semi-directifs). Par ailleurs, concernant le taux de charge et les encours, des réductions sont évoquées mais non précisées, ce qui ne nous permet pas de généraliser ces performances.

Les performances sont globalement confirmées. Cependant l'absence de complétude des informations ne permet pas d'avoir de certitudes d'autant qu'ils sont partiellement contredits par d'autres itérations.

L'exemple donné de l'utilisation de la Phase P1-étude qualitative, à travers l'itération 1-5 Survey 88 études de cas, a contribué à l'alimentation de 3 livrables. L'ensemble des autres itérations ont apporté des éléments aux 5 livrables dont le détail est présenté en Annexe 4.

VI-3 Illustration Phase P2-étude quantitative

Le 2^{ème} pilier du cadre méthodologique est une étude quantitative basée sur un simulateur à événements discrets. Dans le cadre de l'évaluation de DDMRP plusieurs itérations ont été effectuées correspondant soit à un plan d'expériences soit à une preuve de concept (POC), tous sont répertoriés dans DO-Structuration de l'étude. Dans le but d'illustrer l'utilisation de P2-étude quantitative nous présenterons le POC P2-9 POC seuil de pic après avoir rappelé les objectifs et instancié le modèle de simulation.

VI-3.1 P2-9 POC Seuil de pic

La phase P2-2 Études de cas industriels a fait remonter un impact important du seuil de pic. Le cas de l'entreprise 1 a fait remonter une augmentation de 63% du stock lié au paramétrage du seuil de pic à 50% de la zone rouge qui est le paramètre utilisé par défaut selon les experts (P1-3 Entretien semi-directifs).

Le schéma suivant résume les instanciations réalisées (en couleur) sur le modèle dans le cadre de P2-9 POC seuil de pic

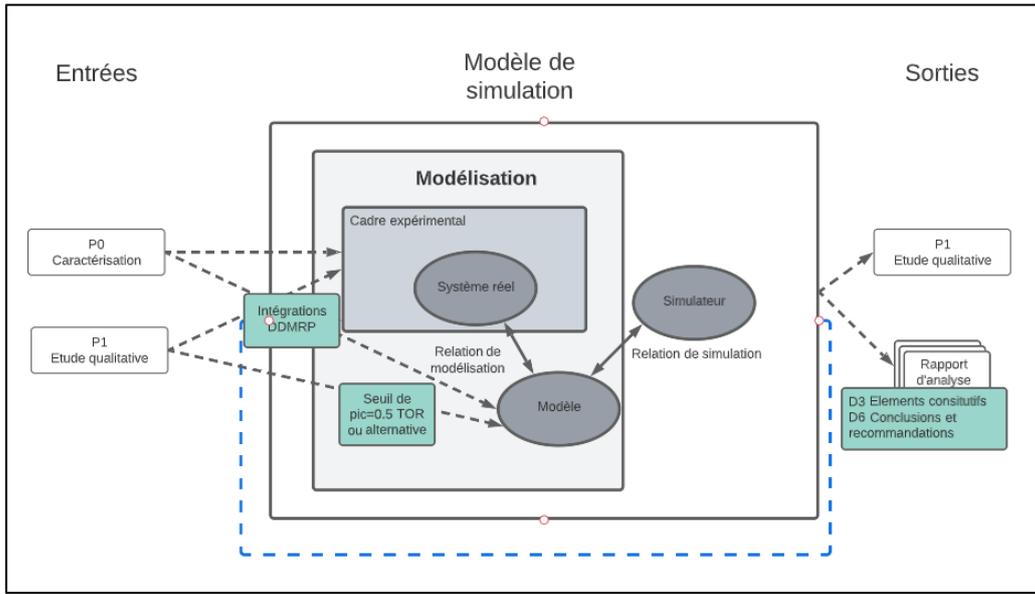


Figure VI-6 Instanciation du modèle de simulation pour P2-9

Du point de vue du modèle et du simulateur, tout d’abord, des aménagements ont dû être intégrés. La logique du modèle s’appuie sur une modélisation systémique basée sur le modèle OID présenté au Chapitre I. Nous réutilisons cette structure au sein du Tableau VI-17 pour expliciter les intégrations réalisées, l’absence de notification signifie que les hypothèses du modèle sont conservées.

Tableau VI-17 Principales hypothèses du modèle appliqué à DDMRP

Système physique :		
hypothèse de base, pas de prise en compte des mouvements physiques ni des moyens de manutention ou de transports		
Composants	Hypothèses	Spécificités DDMRP
Flux fournisseurs	Délai stochastique	
Flux clients	Livraison à date demandée Pas de livraison en avance OTD validé si commande livrée jusqu’à la période ouvrée demandée (journée, semaine) Délai stochastique	
Fabrication	Temps opératoire unitaire stochastique Possibilité de temps de réglage et de taille de lots	
Transfert interpostes	Uniquement en termes de temps de transferts	
stocks	Mise en stocks dès réception des fournisseurs ou du processus de production	
Ressources productives	Jusqu’à 100 Postes de charge composés de ressources identiques	Gestion de la file d’attente par ordre de priorité basée sur le pourcentage de la

	Possibilité de les gérer indépendamment 1 poste de charge = 1 file d'attente commune aux ressources du poste Possibilité de représenter différentes organisations d'atelier	position de la NFE dans le buffer (priorité au % maximum)
Système de pilotage		
Stratégique	Organisation de l'atelier : fixe à l'échelle de l'expérience Mode de réponse à la demande : idem	À décider dans les plans d'expériences, mais non spécifique à DDMRP
Tactique	Détermination des besoins détaillés par produits Détermination de la capacité à court terme Horizon ferme : paramètre à choisir	Non présent dans DDMRP qui agit directement sur le lancement
	Mode de gestion : en fonction du PPC	Individualisation de la décision pour chaque article et donc indirectement décision de bufferiser ou non
	Dimensionnement des stocks : en fonction du PPC	Intégration algorithmes propres à DDMRP (TOR, TOY et TOG) Choix de paramétrage sur les coefficients de variabilité et de délai
	Stock de sécurité : calculé stochastiquement ou exprimé en fonction d'un nombre de périodes de couverture	Non concerné dans DDMRP
	Lead time de planification	Données identiques que pour tout autre PPC, mais automatisation du calcul des DLT et de sa prise en compte dans la planification
	Taille de lot	Pouvant être intégrée pour tous les articles bufferisés ou non
	Planification des ordres prévisionnels	Non concerné
Opérationnel	Lancement effectif des ordres	Mise en place du calcul de la NFE et du processus de décisions Prise en compte du seuil de pic
	Ordonnancement	Fonction du critère de priorité basé sur la position de la NFE dans le buffer
Système d'information		
Informations statiques	Organisation industrielle (nombre de cellules, ressources identiques au sein de la cellule, calendrier) = Lié au cas étudié	
	Taux de charge cible : utilisé pour le dimensionnement des ressources des cas in vitro	Fixé à 80% comme recommandé
	Données techniques (Nomenclature, gammes, temps opératoires, de réglage et de transferts, coûts) = lié au cas	
	Stock initial	= TOY pour éviter les ruptures dans la période de réapprovisionnement initiale
Informations dynamiques	Prévisions : fixe, à profil, variable autour d'une moyenne	Variable autour d'une moyenne (sert uniquement au dimensionnement)
	Demande réelle : tirée à chaque période en fonction de l'horizon ferme choisie	
	Niveaux de stocks et en-cours : mise à jour en temps réel	
	Mise à jour dynamique du dimensionnement des stocks (basée sur le calcul de la consommation moyenne)	Intégration du dimensionnement dynamique à chaque période avec choix de l'étendue et de la composition di calcul de la consommation moyenne+

Les modifications impactent uniquement le SGBDD du simulateur, qui est en charge d'effectuer les calculs basés sur les règles définies par le PPC. Arena n'étant qu'un joueur, la structure du modèle utilisé dans le DES ne change pas, le logiciel :

- n'effectue aucun calcul lié au PPC, le carnet d'ordres est préparé en amont en fonction de la procédure propre au PPC,
- lance les ordres prévus par le PPC sous condition que les stocks de composants soient disponibles,
- exécute les opérations du système physique (approvisionnement, fabrication et livraison) sous délai stochastique,
- calcule dynamiquement les indicateurs.

Concernant le cadre expérimental, il n'y a aucun changement sur les indicateurs à mesurer. Le plan d'expériences établi a pour but d'explicitier le rôle du seuil de pic décelé lors de l'itération P2-2 Étude de cas industriels. Un cas simple a été choisi pour réaliser une analyse plus fine des phénomènes en jeu.

Données du cas

- 1 seul article
- Buffer avec CMJ à 100 et DLT 3, facteur de délai 0.4 et facteur de variabilité 0.5. Ces données conduisent aux zones de buffer présentées dans le [Tableau VI-18](#)

Tableau VI-18 Zones du buffer cas P2-9

TOR	TOY	TOR
180	480	600

- 3 scenarii sont établis avec le seuil de pic comme facteur. Les 3 modalités retenues sont celles du seuil de pic issues de PO-1 Appropriation des concepts. Compte tenu des données du cas les valeurs initiales du seuil pour chaque scénario sont présentées dans le [Tableau VI-19](#).

Tableau VI-19 Modalités du plan d'expériences

	Seuil de pic	Valeur initiale du seuil
Scénario 1	50% TOR	90
Scénario 2	TOR	180
Scénario 3	2*consommation moyenne	200

Ce seuil évolue dynamiquement en fonction de la demande réelle mais reste proche des valeurs initiales

- La demande réelle s'établit à 100 pièces +/-15% déterminée par une loi uniforme.

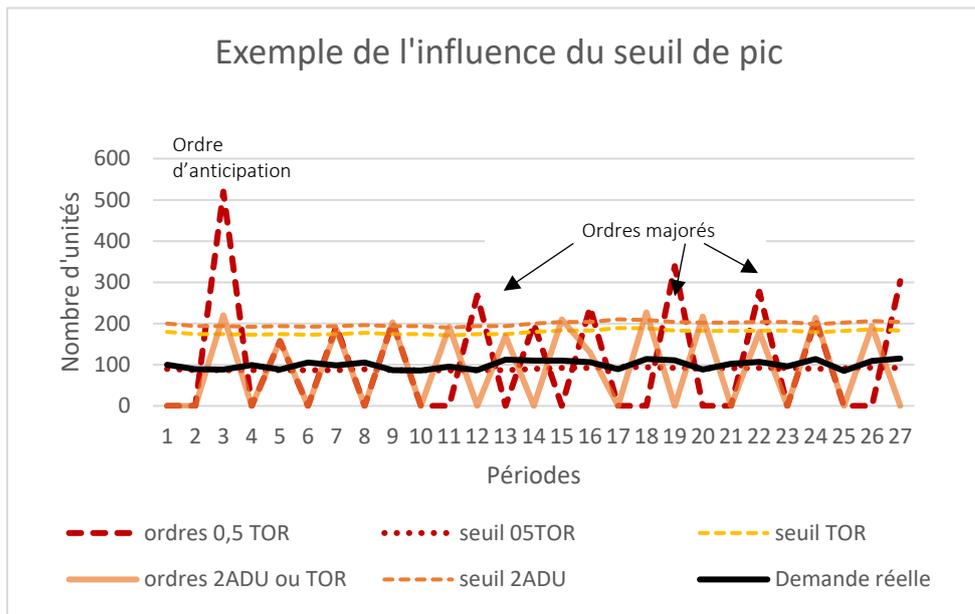


Figure VI-7 Comparatifs des seuils et des ordres générés pour P2-9

Sur le comparatif du carnet d'ordres présenté dans [Figure VI-7](#), il n'y a pas d'écart entre un seuil fixé au niveau du TOR ou à 2 jours de consommation moyenne. Par contre, le seuil de pic par défaut fixé à 50% de la zone rouge conduit à moins d'ordres mais plus importants. Sur la simulation menée la taille des ordres moyens sont de 211 contre 195 dans les 2 autres cas soit 8% d'écart (48 ordres contre 52).

La simulation est lancée pour 100 périodes avec 10 répliquions pour chaque scénario.

Résultats

Les résultats obtenus sont présentés dans le [Tableau VI-20](#).

Tableau VI-20 Résultats de P2-9

Scénario	Seuil de pic	OTD En %	STOCK (base 100 résultat 50%TOR)
1	50% TOR	100	100
2	TOR	100	66

La simulation montre un OTD parfait pour les 3 scénarii mais un écart important sur les niveaux de stock : -34% pour les scénarii 2 et 3 (TOR et 2CMJ) comparativement au scénario à 50% de la zone rouge qui est la valeur utilisée par défaut pour ce paramètre. Il apparaît donc que le seuil de pic à 50% conduit à des ordres plus importants et dégrade la performance financière mais n’a pas eu d’influence sur la performance client.

Cela pose nécessairement la question de pertinence de ce choix de seuil par défaut. Ce POC démontre une influence importante du Seuil de Pic mais il faut prendre en considération les autres paramètres qui influencent la zone rouge.

VI-3.2 Exemple de contribution de P2-9 aux livrables : participation aux analyses de D3

L’itération P2-9 POC Seuil de pic a contribué au livrable D3 Synthèse des éléments constitutifs et a permis de formuler une recommandation quant au choix du seuil de pic reporté dans D6 Conclusions et recommandations.

L’itération P2-9 a fait apparaître que le rôle du seuil sur la taille des ordres est incontestable. Il est donc important de le paramétrer correctement. Cependant d’autres éléments sont à prendre en considération dans la fixation de la zone rouge (cf [Tableau VI-21](#)). Des tests rapides sur le paramétrage font apparaître un rôle :

- (5) Du DLT : plus il est important plus la zone rouge est importante et éloignée de la consommation moyenne périodique ce qui réduit la détection de pic. Une fois de plus le placement des buffers (3) joue un rôle ainsi que la fixation des Lead Time de planification (4).
- (6) du facteur de variabilité : d’après DDMRP, plus un article est variable plus il faut augmenter le facteur pour augmenter la taille du buffer. Cela étant, il conduit paradoxalement à un plus haut seuil de détection de pic, ce qui pourrait réduire leur détection.
- (7) Du facteur de délai : plus il est haut, plus le seuil de pic augmente. D’après les recommandations, le facteur est fonction inverse du délai ce qui signifie que les articles à délais longs auraient un seuil plus bas cependant cette relation inverse est contrebalancée par le DLT.

En l’absence de précision sur le rôle exact des paramètres, il semble logique de vérifier que le choix de paramétrage ne fasse pas descendre le seuil de détection sous la demande moyenne sous peine de détecter de nombreux pics et donc de majorer le niveau de stock.

Tableau VI-21 D3 synthèse des éléments constitutifs de DDMRP

Nature	Imposé	Déterminé	
		Paramètre (obligatoire ou optionnel)	« critère de choix »
Utilisation			
Paramétrage	(1) Consommation moyenne (CMJ) (P0-1-A) (2) Nomenclature (P0-1-A)	(3) Placement des buffers (4) LT (5) DLT	Heuristiques (P0-1-A, P0-2-A, P1-3-A), DLT (P2-5-A) Fiabilité des délais (P2-2A) Lié aux placement des buffers (P0-1-A, P1-3-A, P2-5-A)
		(6) Facteur de variabilité (7) Facteur de délai (8) Taille de lot (9) Cycle de commande (10) Horizon de calcul de la CMJ (11) Seuil de pic	Variabilité demande (P0-1-A, P2-12-C) Longueur des délais (P0-1-A) Temps et coût de réglage ou contrainte technique P0-1-A Fréquence souhaitée (P0-1A) 3 grands options (P0-1-A) 3 options (P0-1-A, P2-2-C, P2-9-C)

		(12) Horizon de pic	Minimum DLT de la référence (P0-1-A)
Pilotage	(13) NFE = Stock physique + réapprovisionnement en cours – besoins qualifiés Besoins qualifiés = retard + ordre du jour + pics qualifiés Pics qualifiés = sur un horizon défini (celui de prise en compte des ordres réels) quantité totale d'une journée qui dépasse le seuil de détection de pic (en général = 50% zone rouge) TOG et TOY (P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	L'ensemble des éléments utilisés dans le calcul sont définis lors de la Phase de paramétrage, la décision repose donc sur le paramétrage(P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	

Nous avons présenté une illustration de P2-étude quantitative à travers l'exemple de l'itération P2-9 POC taille de lot. À titre d'illustration de l'utilisation itérative du cadre méthodologique, nous choisissons de détailler la question Q4 Impact du placement des buffers sur la performance de DDMRP. Cette question a été soulevée dès la phase P0-1 caractérisation et a permis 4 itérations que nous présentons dans le paragraphe suivant.

VI-4 Illustration de l'utilisation itérative du cadre méthodologique : le cas du placement de buffer

Nous expliciterons d'abord les origines de la réflexion et l'utilisation du cadre méthodologique puis nous détaillerons le plan d'expériences mis en œuvre pour approfondir la compréhension de DDMRP sur ce point.

Le [Tableau VI-22](#) est un extrait du livrable D0-Structuration de l'étude qui permet de tracer les différentes itérations et les questions soulevées au sein des interfaces concernant le placement des buffers.

Tableau VI-22 Extrait de D0 focalisé sur la question du placement des buffers

Phase	Libellé	Objectifs visés
P0-1	Appropriation des concepts Interface P0 ► P1/D3 Interface P0 ► P2/D3	Acquisition des concepts de base Des heuristiques sont proposées pour guider les utilisateurs dans le choix du placement. Les utilisateurs suivent-ils ou bien ont-ils recours à d'autres critères ? Le placement des buffers est la 1ère étape du paramétrage ? A-t-il une influence sur la performance?
P0-2	État de l'art initial Interface P0 ► P2/D3	Identification des problématiques Impact du placement des buffers assez peu investigué
P1-1	Entretiens ouverts Interface P1 ► P2/D3	Approfondissement de la connaissance de DDMRP, Identification de points clé au sein du Guide thématique Le placement des buffers se fait avec les heuristiques et il vaut mieux multiplier les buffers. Est-ce que ce que tous les choix conduisent au même niveau de performance?
P2-2	Études de cas Industriels Interface P2 ► P1/D3 Interface P2 ► P2/D3	Vérifier la performance de DDMRP dans un environnement plus complexe Le placement des buffers semble avoir une importance qu'il est difficile d'évaluer La taille des ordres générés par les paramètres de DDMRP semble être problématique

P1-3	Entretiens semi-directifs	Analyse des résultats issus des cas industriels
P2-5	Impact des buffers	Étude de l'impact du placement et du nombre des buffers

VI-4.1 P0-1 appropriation des concepts : émergence de la problématique

La phase de caractérisation a soulevé la question du placement des buffers dès le début de l'étude. La phase P0-1 Appropriation des concepts fait apparaître que le placement des buffers est considéré par les auteurs comme un élément « stratégique » de DDMRP. Cependant, ce type de choix ne nous paraît pas être réellement de nature stratégique puisqu'il ne présente ni d'impact sur le long terme ni de caractère irréversible. Toutefois, l'utilisation de cet adjectif par les auteurs semble souligner l'impact potentiellement important du choix et ils fournissent des heuristiques pour le placement des buffers au sein d'une nomenclature. Ainsi, ils considèrent différents éléments à évaluer en fonction du DLT qui résulte du choix du placement:

- Le délai attendu par les clients,
- Délai d'opportunité de marché : permet d'augmenter les prix ou d'attirer de nouveaux clients en réduisant le délai de réponse,
- Horizon de visibilité des commandes,
- Variabilité externes : clients et fournisseurs, le buffer permet de se protéger des variations,
- Points de levier et flexibilité du stock : l'endroit qui laisse le plus de flexibilité pour répondre au besoin (ex différenciation retardée),
- Protection des opérations critiques : permet de couvrir les ressources sous contraintes.

P0-2 État de l'art initial ne recense que 3 publications évoquant le placement des buffers. Mais parmi ces publications aucune aborde la pertinence des heuristiques ou l'impact sur la performance.

À l'issue de la phase P0-caractérisation, le placement des buffers nécessite donc le traitement par les autres phases. 2 questions remontent à travers les interfaces :

- Interface P0 ► P1/D3 :

La phase *P0-1 Appropriation des concepts* relève que le placement des buffers est la 1^{ère} étape de DDMRP. Des heuristiques sont proposées pour guider les utilisateurs dans le choix du placement. Les utilisateurs suivent-ils ou bien ont-ils recours à d'autres critères ?

- Interface P0 ► P2/D3

Le choix du placement des buffers repose a priori sur des heuristiques. Cependant les conséquences sur la performance de ce choix ne sont pas évaluées. Le placement des buffers a-t-il une influence sur les performances quantitatives ?

VI-4.2 P1-1 Entretiens ouverts : des heuristiques pertinentes

Devant la question du placement des buffers, les premiers experts consultés nous ont indiqué suivre les heuristiques avancées par DDMRP. Aucune autre approche ne nous a été rapportée.

VI-4.3 P2-2 Étude de cas industriels : des résultats contre-intuitifs

Dans le cadre de l'étude ESCAPADD, les deux études de cas in-vivo ont conduit à mener une réflexion sur le placement des buffers. Le placement des buffers a été réalisé en concertation avec les équipes de planification de deux industriels, conformément aux heuristiques de DDMRP et sur recommandations des experts.

Le produit fini est composé de 7 niveaux de nomenclature avec un total de 30 composants. En accord avec l'entreprise, 2 placements ont été testés :

- Tous les composants des niveaux 2, 3 et 5

- Tous les composants de niveaux 3 et 5

Sur demande de l'entreprise 2 scénarii de demande ont été testés sur la base de leurs prévisions :

- Le 1^{er} est celui d'une demande totale identique mais avec des décalages dans les dates de livraison. On constate un écart de 17 points de niveau de stock pour un OTD équivalent à 97% à la faveur de 2 niveaux bufferisés.
- Le second est une demande fortement variable de +/-30% autour de la prévision. Ce scénario conduit à un OTD de 74% pour 3 niveaux de buffers avec un niveau de stock 18 points au-dessus de la version à 2 niveau de buffers qui atteint 90% d'OTD.

Ce 2^{ème} résultat est paradoxal puisqu'avec davantage de buffers, on dégrade l'OTD. On constate par ailleurs une dégradation des résultats comparativement à la performance réelle des entreprises.

VI-4.4 P1-3 Entretien semi-directifs : un éclairage indispensable

Face à ces résultats, la question a, de nouveau, été soumise à des experts au sein de P1. Les experts nous ont indiqué 2 approches :

- La mise en place de buffer à un seul endroit pour se protéger de l'une des sources de variabilité, e.g. des buffers sur les produits achetés pour se protéger des aléas fournisseurs. Cette approche est, d'après eux, souvent le point d'entrée dans la méthode DDMRP.
- La multiplication des buffers au sein d'une nomenclature pour réduire les délais découplés et/ou se protéger de plusieurs sources potentielles de variabilité. Toujours selon plusieurs experts, cette approche est considérée comme indispensable.

On peut donc se poser la question de l'impact du nombre et du placement des buffers au sein d'une même nomenclature. C'est ce qui a conduit à la création d'un plan d'expériences in-vivo centré sur ces questions et donc à un retour à la P2 avec des facteurs précis à tester. Nous présentons dans le paragraphe, suivant, le cas d'étude créé et le plan d'expériences qui a été mené en vue de répondre à cette question.

Cette itération a également permis de faire émerger un problème lié à la taille des ordres qui a été traité dans un POC spécifique P2-3.

VI-4.5 P2-5 Impact du Placement de buffer : valider les hypothèses

Le choix a été fait de se focaliser sur un seul produit fini afin de mener une analyse approfondie sur un cas simple. Nous avons choisi de nous baser sur un exemple donné dans l'ouvrage de (Ptak and Smith, 2016) : le produit FPB de la Compagnie ABC. Sa nomenclature est présentée dans la Figure VI-8 :

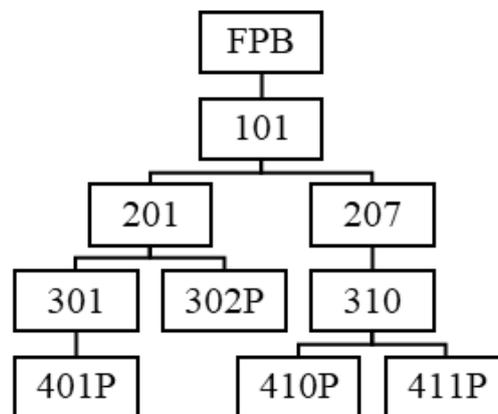


Figure VI-8 Nomenclature de FPB

FPB est composé de 5 articles semi-finis et de 4 articles achetés (indiqués avec la lettre P) soit une base de 10 articles dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau VI-23.

Tableau VI-23 Principales données articles du cas P2-5 Impact du placement de buffer

Article	Lead Time de planification en semaine	Coût unitaire	Temps opératoire unitaire en heures	Nombre de ressources dans la cellule
FPB	1	500	0,3	1
101	3	500	0,9	2
207	3	290	0,9	3
310	2	290	0,6	3
411P	30	200		
410P	30	90		
201	5	210	1,6	5
301	4	110	1,2	4
401P	10	110		
302P	12	100		

La demande moyenne s'établit à 100 FPB par semaine, ce qui a servi de base au dimensionnement du système de production.

Les hypothèses du système de production de cette expérience sont :

- La périodicité de planification est hebdomadaire, le plan est établi en début de semaine.
- La demande moyenne est établie à 100 pièces par semaine.
- Le temps de travail est de 39h par semaine soit de 5x8 + 1x7h.
- Chaque produit est fabriqué dans une cellule qui lui est dédiée. Le nombre de ressources de chaque cellule est dimensionné en fonction du temps opératoire unitaire et des temps de réglage.
- Le coût horaire des machines est fixé à 70€, un tarif issu des cas industriels qui représente une réalité possible.
- L'absence de temps de transferts et de réglage.
- L'OTD est calculé à la fin de la semaine de travail, donc à la fin du 5^{ème} jour.
- L'horizon ferme est de 4 semaines.
- Il n'y a aucun système de gestion des urgences ; les ordres complets sont priorisés.
- Les files sont gérées avec le facteur de priorité représentant le pourcentage de la NFE dans le Buffer.

Concernant les paramètres spécifiques à DDMRP, les buffers sont calculés avec :

- Zone verte = maximum des 3 options possibles avec taille de lot à 1 et cycle de commande à 1 semaine.
- Seuil de pic = 50% de la zone rouge par défaut.
- Calcul de l'ADU effectué chaque semaine avec un mélange de 4 semaines d'historique et 8 de semaines de prévisions.
- Coefficient de délai : ils sont présentés dans le [Tableau VI-24](#). L'attribution du coefficient est faite automatiquement en fonction de la catégorie de délai du DLT d'un article bufferisé.

Tableau VI-24 Coefficients de délai pour P2-5

	Délai Court		Délai Moyen		Délai Long	
	Nb de semaines	coefficient	Nb de semaines	coefficient	Nb de semaines	coefficient
Articles fabriqués	<3	0.7	3≤D<9	0.4	9 ≤	0.25
Articles achetés	<10	0.7	10≤D<20	0.5	20 ≤	0.3

- Coefficient de variabilité : ils sont présentés dans le [Tableau VI-25](#).

Tableau VI-25 Coefficients de variabilité de P2-5

	Faible	Moyenne	Forte
Variabilité client	5% ≤	≤15%	20%<
Articles achetés	0.25	0.5	0.75

Les facteurs du plan P2-5 Placement des buffers

L'objectif principal est de vérifier l'impact du placement des buffers sur la performance. Le facteur F1 de ce plan est le placement du buffer. Compte tenu de la nomenclature du produit FPB, nous avons opté pour 7 possibilités représentées dans le [Tableau VI-26](#).

Tableau VI-26 Placement des buffers

Valeur du facteur F1	1	2	3	4	5	6	7
Placement du buffer	F	S	A	F-S	F-A	S-A	F-S-A
FPB	B			B	B		B
101							
207		B		B		B	B
310							
411P			B		B	B	B
410P			B		B	B	B
201		B		B		B	B
301							
401P			B		B	B	B
302P			B		B	B	B

Avec F = Produit fini, S=semi-finis et A = acheté

Les options 1 à 3 sont les placements avec 1 seul niveau de buffer, soit sur le produit fini (F) soit sur les semi-finis (S) soit sur les articles achetés (A). Concernant le choix du niveau pour les semi-finis, il correspond au 1^{er} niveau de semi-fini bufferisé dans l'exemple source. Les modalités 4 à 7 sont un mélange des 3 autres modalités, la dernière combinant les 3 placements de buffers.

Les buffers étant censés protéger de la variabilité, le choix de leur placement pourrait avoir une influence sur la performance en fonction du type et du niveau de variabilité. Au facteur de positionnement, nous avons ajouté 3 facteurs portant sur les sources de variabilité à savoir les clients, les fournisseurs et les process :

- F2 : variabilité client, variation de la quantité demandée
- F3 : variabilité fournisseurs, variation des délais de livraison
- F4 : variabilité process, variation du temps opératoire

Pour les 3 facteurs, la variabilité s'exerce en appliquant un coefficient (issu d'un tirage aléatoire basé sur la loi uniforme) soit à la quantité (variabilité client) soit au délai (fournisseur et process). Les modalités sont présentées dans le [Tableau VI-27](#).

Tableau VI-27 Modalités de variabilité

	Faible	Moyenne	Forte
Variabilité	Uniforme (0.95, 1.05)	Uniforme (0.85,1.15)	Uniforme (0.5, 1.5)

Compte tenu des 4 facteurs et de leur nombre de modalités, le plan complet comporte 189 expériences.

La simulation à événements discrets a été menée sur une durée de 82 semaines incluant un Warm up de 4 semaines, soit une expérience de 1 an et demi (78 semaines) classique de la planification dans l'aéronautique. Le fichier des ordres correspondant a été établi sur 104 semaines pour éviter l'arrêt précoce des ordres par absence de demande. Chaque expérience comporte 100 répliques.

Résultats du PE2-5

Les indicateurs valeur de stock et OTD pour chaque expérience sont reportés dans la [Figure VI-9](#).

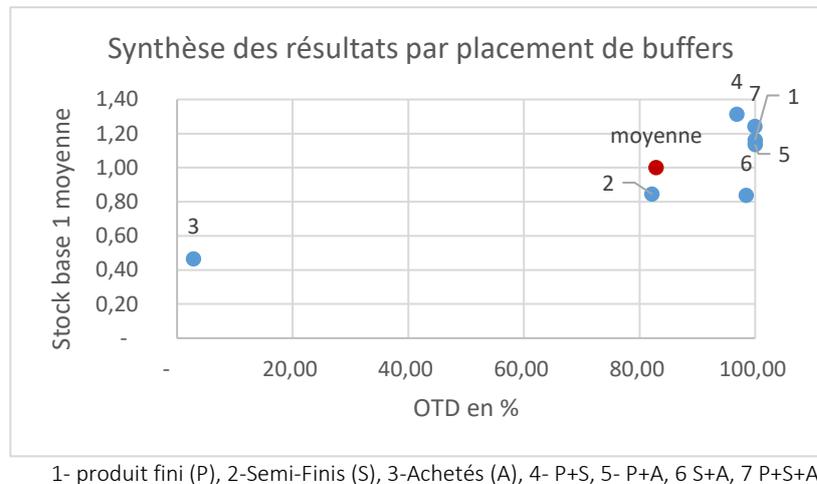


Figure VI-9 Extrait des résultats de P-5 Placement des buffers

Les placements avec plusieurs buffers et le buffer sur le produit fini permettent d'atteindre un OTD parfait quel que soit le type et le niveau de variabilité. Par contre, le classement des placements de buffers en ce qui concerne le niveau de stock est difficilement interprétable car il dépend du nombre d'articles, de leur coût unitaire et des temps opératoires. Les valeurs de paramètres utilisées peuvent avoir influencé les résultats. On ne peut donc pas conclure sur cet aspect financier.

- Le buffer uniquement sur les produits achetés minimise le montant mais l'OTD est particulièrement mauvais (<10%). Une telle contreperformance nécessite des investigations supplémentaires.
- Le placement sur les produits semi-finis réduit le niveau de stock mais l'OTD est médiocre comparativement à la solution combinant produits achetés et semi-finis.

P2-5 Placement des buffers apporte des éléments concrets sur le placement des buffers :

- Mise en évidence d'un impact tant sur l'OTD que sur la performance financière.
- Confirmation de l'intérêt de multiplier les buffers au sein de la nomenclature.
- Faiblesse de la performance pour les buffers situés uniquement sur les produits semi-finis et sur les produits achetés.

Cependant les résultats nécessitent des investigations supplémentaires pour déterminer les facteurs qui pourraient expliquer la contreperformance du placement des buffers sur les produits achetés.

L'exemple de la méthode déployée pour évaluer l'impact du placement des buffers n'est qu'une illustration de l'utilisation itérative du cadre méthodologique utilisé pour évaluer DDMRP. Il démontre que, compte tenu du niveau de connaissances et de l'évolutivité de la méthode DDMRP, des allers-retours entre les études qualitative et quantitative sont nécessaires pour améliorer la compréhension de son fonctionnement. Les résultats ont conduit à d'autres investigations qui ont enrichi les livrables sur d'autres thématiques.

L'analyse de l'ensemble des résultats a mené à la rédaction du rapport d'analyse et de ses 7 livrables pour l'évaluation de la performance globale de DDMRP. La densité de ce dernier ne nous permet pas de l'intégrer dans ce mémoire, il est consultable en Annexe 4. Par souci de synthèse, nous présenterons seulement quelques éléments de D6-Conclusions et recommandations car il représente l'état actuel de la connaissance issu de l'utilisation du cadre méthodologique.

VI-5 D6 Conclusions et recommandations pour DDMRP

Pour rappel les livrables 1 à 5 donnent une vision itérative autour d'une thématique PPC. D6-Conclusion et recommandation est le livrable qui donne la vision à date de chaque livrable ainsi que les principaux points à retenir. Nous ne détaillerons pas l'ensemble des livrables mais présenterons uniquement D4 Analyses des indicateurs et D5 Analyses bénéfiques/risques puisqu'ils sont centrés sur la performance en termes quantitatifs et qualitatifs. Par ailleurs nous, à titre de synthèse nous exposerons les parties Conclusions et Recommandations qui constitue l'analyse que nous faisons de DDMRP à date.

VI-5.1 État final D4 Analyse des indicateurs

D4 est le livrable qui présente les 6 indicateurs utilisés pour définir la performance (cf. [Tableau VI-28](#))

Tableau VI-28 D4 analyse des indicateurs de DDMRP

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée (Phase0)		Performance in vivo (Phase1)		Performance in vitro (Phase2)
		Médiane	MAX	Médiane	MAX	
Performance client	(1) OTD	+17%	+45%	+15 pts (P1-2)	+50pts (P1-2)	+5pts (P2-1) -16 à -50 points (P2-2) 100% (P2-5, P2-6 et P2-7) sous condition de lots de transfert et de visibilité suffisante
	(2) Profondeur du retard	NC	NC	Des cas de réduction non quantifiée (P2-5-A°)		
Performance du système industriel	(3) Taux de charge :	NC	NC	Libération de capacité (P1-4)		
	(4) Lead time	-60%	-85%	-50pts (P1-2)	-85pts (P1-2)	En augmentation à cause de la taille des ordres (P2-2, P2-3)
Performance financière	(5) stock total	-26%	-54%	-28 pts (P1-2)	-60pts (P1-2)	En augmentation (P2-1-A, P2-2C)
	(6) Pourcentage des encours	NC	NC	Des cas de réduction des encours évoqué (P2-5-A)		En augmentation P2-2

L'étude des différents indicateurs donne des **résultats contradictoires**. Les performances annoncées (P0) et celles recensées par P1 sont bonnes sur tous les axes. Cependant sur les cas documentaires P1-2, on ne dispose que d'informations partielles pour la plupart des entreprises. Seules 3 entreprises communiquent sur l'amélioration conjointe des 3 axes. Ce constat **pose la question d'éventuel compromis à réaliser entre les différents axes de performance**. On note, par ailleurs, une confusion sur l'indicateur Lead Time qui correspond au temps de réponse au client et non au Lead Time Industriel c'est-à-dire le délai entre le lancement d'un ordre et sa mise à disposition. En l'absence de précision sur les cas documentaires, il est difficile de faire la différence entre les 2. Sur les retour d'expériences issus des Entretiens semi directifs P1-3 et des visites d'entreprises P1-4, le temps de réponse au client est logiquement amélioré par l'instauration de buffer. Sur le lead time industriel, 2 entreprises nous ont fait part de son amélioration grâce à la libération de capacité permise par DDMRP. Il reste cependant difficile de confirmer cette performance.

Cependant, les résultats issus des simulations de la phase P2 ne sont pas aussi convaincants. Sur les simulations **in-vitro**, **l'OTD est bon sous condition de visibilité suffisante de la demande et de la création de lot de transferts**. Sur les expériences **in-vivo** (P2-2), les résultats de DDMRP sont inférieurs à la performance réelle des deux entreprises et à MRP2 simulé, ce qui signifie que les décisions humaines ne sont pas entièrement à l'origine de la performance actuelle. **Le contexte particulier de ces entreprises, pourrait expliquer ces contreperformances : rate based avec de très faible volume et des délais longs** conduisant à des DLT forts majorant le problème de taille de lot. Sur les cas in-vitro, l'OTD est bon sous réserve du paramétrage correct et de l'utilisation de lot de transfert.

Concernant le **niveau de stock**, les résultats ne permettent pas d'établir de généralités. Les placements des buffers P2-1 a logiquement un impact mais chaque situation industrielle peut conduire à des résultats très

différents en fonction de la répartition des coûts. Des simulations pré-implantation peuvent permettre de déterminer le cout des buffers, cependant la formule proposée par DDMRP pour évaluer le stock cible n'a pas été confirmée. Il apparait que les montants sont supérieurs à ceux annoncés.

Par ailleurs, l'ensemble des plans d'expériences réalisés et leur calibrage, nous a montré une **sensibilité des résultats au paramétrage de DDMRP**. À ce stade, il ne nous a pas permis de la quantifier mais nous relevons un rôle majeur du DLT et du seuil de pic.

Enfin, les différentes phases réalisées n'ont pas permis d'alimenter les

VI-5.2 État final D5 Analyse Bénéfices/Risques

D5 est la centralisation des avantages et inconvénients recensés tout au long de l'étude. Les résultats sont présentés dans le [Tableau VI-29](#).

Tableau VI-29 D5-Analyse bénéfiques/risques pour DDMRP

		Bénéfices/avantages	Inconvénients/Risque
Décision : choix du PPC	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Simplicité des POC (P1-3/A, P1-4/C) •Décision poussée par la volonté d'améliorer les stocks (P1-4/A, P1-5/C) 	<ul style="list-style-type: none"> •Philosophie très éloignée de la vision coût très largement ancrée (P1-4/A) •Manque de maturité sur les aspects SCM et performance industrielle (P1-3A)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> •Nombreux exemples français de réussite de projets DDMRP (P1-3A) •Assurer un meilleur taux de service au client (P1-4/A, P1-5/C) •Saisir de nouvelle opportunité de marché (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Aspect trop marketing de la méthode (P1-4/A) •Les anglicismes sont parfois vus comme rédhibitoires (P1-4/A)
Phase d'implantation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Facilité des concepts permettant une compréhension des utilisateurs (P1-3/A, P1-4/C) •Rapidité des résultats (P1-3/A, P1-4C) •Rapidité de mise en œuvre (P1-3/A, P1-4/C) •Possibilité de former en interne (P1-3/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) Non-implication de la direction générale (P1-3/A, P1-4/C) •Difficulté des paramétrages (P1-4/A) •Risque d'augmentation des stocks au lancement de DDMRP (P2-1/A, P2-2/C, P1-3/C, P1-4C) •Départ du leader (P0-1/A, P1-3/C) •Taille du projet initial (P1-4/A) •Absorption par une autre entreprise ne partageant pas la vision flux (P1-4/C)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> •Des cabinets français en pointe (P1-3/A, P1-4/C) •Une communauté active qui partage les expériences (P1-4/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Dépendance au cabinet-conseil (P1-3/A, P1-4/C)
Phase d'utilisation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Amélioration de la gestion des priorités (P0-1/A, P1-3/C, P1-4/C) •Amélioration considérable et unanime du travail des planificateurs notamment par le côté visuel de la méthode et la gestion des priorités (P1-3/A, P1-4/C) •Amélioration de la performance client (P0-1/A, P2-1/C, P1-3/C, P1-5C) •Plus de résilience en cas de problème (P1-3/A, P1-4/C) •Amélioration de la qualité des stocks (P1-3/A, P1-4/C, P1-5C) 	<ul style="list-style-type: none"> •Outils dépendants de l'ERP entretiennent la résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) •Augmentation possible des stocks à terme (P2-1/A, P1-3/C, P1-4C, P1-5/C) •Besoin de polyvalence (cf. buffer de compétences) (P1-4A) •Absence d'outil de gestion de la capacité (P1-4/A) •Nécessité de modifier les indicateurs (P1-3/A) •Obligation de former / coût de la formation

	Externe	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du temps de réponse au client (P1-4/A) • Opportunité de marché par meilleure disponibilité (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-implication des clients qui ne souhaitent pas partager le coût des buffers (P1-4/A) • Indiscipline des clients qui transmettent des ordres erratiques perturbant le système (P1-4/A)
--	---------	--	---

L'ensemble des éléments qualitatifs présentés dans le tableau sont détaillés dans le livrable D5. À titre de synthèse, nous retenons comme atouts majeurs la simplification du travail des planificateurs permise par la simplicité et le côté visuel de DDMRP et l'amélioration sans conteste de la gestion des priorités.

Du point de vue des points faibles, l'absence d'outil de gestion de la capacité dans DDMRP est beaucoup reprochée. Il nécessite le développement d'outils interne ou bien le déploiement d'autres couches de DDAE. Cependant, ces dernières ne font pas l'objet d'autant de développement que DDMRP pour le moment et sont donc moins mises en œuvre. De plus, le changement total de vision de la performance et d'approche dans la planification nécessite des transformations en profondeur majorant la résistance au changement et donc pas toujours évidentes à mettre en œuvre. Les entretiens réalisés ont démontré l'importance de l'implication de la direction, de la formation massive de l'ensemble des personnes impliquées dans le processus de planification. Cela inclut, en plus des planificateurs, les équipes logistiques et de production, les acheteurs voire la direction financière qui doit apporter son soutien pour implanter une méthode qui remet les stocks au cœur du processus de production contrairement à ce qui est prôné par la vision Lean depuis plus de 20 ans. Enfin, les personnes interviewées, qui trouvent pourtant la méthode simple, signalent des difficultés de paramétrage notamment par manque de compréhension des implications de chaque paramètre.

À l'issue des analyses menées sur l'ensemble des livrables, nous formulons quelques recommandations et pistes de réflexions pour mener des itérations supplémentaires.

VI-5.3 Recommandations pour l'utilisation de DDMRP

Ces recommandations sont formulées pour les utilisateurs de DDMRP en fonction de chaque phase du projet DDMRP

- Choix :
 - o Il n'existe pas de cas de ETO pour le moment ce qui pose réellement l'intérêt de ce type de PPC pour cet environnement.
 - o L'intérêt pour les environnements rate based n'est pas confirmé, des POC sont donc nécessaires avant lancement du projet.
 - o L'implication de la direction est indispensable car DDMRP implique un changement radical de vision qui doit être aligné avec la stratégie générale.
 - o DDMRP est un PPC opérationnel qui n'embarque pas d'outil de gestion de la capacité. Les implications doivent être intégrées dès la phase de choix : nécessité d'outils complémentaires ou extension vers DDAE.
- Implantation
 - o D'un point de vue général :
 - La formation de l'ensemble des personnes impactées par le processus de planification doit être réalisée. Cela inclut planificateurs, les équipes logistiques et la production, les acheteurs voire la direction financière
 - La simulation est nécessaire pour évaluer non seulement l'impact du placement des buffers mais également celui du choix des paramètres.
 - o Du point de vue du paramétrage
 - Le Critère DLT résultant des placements de buffers doit être pris en compte car il impacte fortement les niveaux du buffer donc le stock total mais également la taille des ordres et le seuil de pic.

- Le recours au maximum de la zone verte n'est pas forcément adapté à toutes les entreprises. Là encore une simulation en amont peut permettre de définir le choix le plus adapté.
 - Le seuil de pic doit être supérieur à la consommation périodique sous peine de créer du stock d'anticipation et de détecter trop de pics.
 - En cas de faible variabilité, opter pour un seuil de variabilité basé sur la consommation périodique.
- Utilisation :
- La création de lot de transferts peut limiter l'impact des tailles d'ordres trop importante générées par DDMRP.

VI-5.4 Pistes de réflexion

Le travail mené a pour but d'évaluer DDMRP. À ce jour, des questions restent en suspens et plusieurs pistes de recherche ont émergé :

- Environnement productif :
- Accessibilité de la méthode pour les TPE : est-ce que la taille de l'entreprise est un frein en soi ou plutôt un problème de moyens et/ou de maturité ?
 - Environnements multi produits : L'un des objectifs du travail était de comprendre DDMRP. Par conséquent, les plans d'expériences ont été focalisés sur un environnement mono-produit qui limite les phénomènes à une seule source de demande et simplifie les analyses. Maintenant que la compréhension est acquise, les environnements multi produits doivent être testés pour évaluer la performance de DDMRP dans un environnement productif plus proche de la réalité industrielle ce qui inclut la multiplication des produits finis.
 - Complexité BOM : deux hypothèses majeures sous-tendent le plan d'expériences mené dans cette étude. La première est la faiblesse des délais unitaires conduisant à des DLT faibles et la seconde est la spécialisation des ressources sur une seule référence ce qui simplifie le flux de production. Ces hypothèses ne sont pas représentatives de la complexité de certains systèmes de production. Les résultats pourraient être assez différents avec des délais plus importants ou un partage de ressources productives. Des expériences complémentaires doivent être menées pour confirmer l'absence d'impact de la complexité de la nomenclature.
 - Profil de la demande : l'adaptation de DDMRP aux demandes récurrentes de très faible volume n'est pas confirmée. Par ailleurs, le cas des demandes sporadiques n'a pas du tout été abordée.
- Paramétrage
- Le DLT pourrait être un critère de placement des buffers majeur à intégrer tel que tous les buffers aient $DLT < Horizon$ ferme. L'horizon de visibilité des commandes est effectivement évoqué par DDMRP mais plutôt pour le produit fini. D'après les plan d'expériences réalisés, il semblerait que l'impact existe pour l'ensemble des buffers.
 - La sensibilité des paramètres Facteur de Variabilité et Seuil de pic semble être différente en fonction des DLT. Concernant le Facteur de variabilité, les recommandations faites par DDMRP établissent 3 niveaux de variabilité impliquant 3 Facteurs différents. Cependant, il n'existe pas d'aide à la décision pour fixer objectivement les limites des niveaux et le paramètre lui-même et le DLT n'est pas intégré à la réflexion. Concernant le seuil de pic, il serait intéressant de confirmer le besoin d'une gestion différenciée en fonction de la DLT.
 - Les propositions de choix pour le seuil de pic conduisent à des contreperformances en termes de niveau de stock notamment lors de l'abaissement du Facteur de variabilité en conjonction avec des DLT faibles. Une nouvelle option pour seuil de pic : $CMJ * (1 + \text{écart type de la demande})$ pourrait être une piste permettant de limiter les effets pervers de

l'abaissement de la variabilité tout en offrant une alternative basée sur une logique admise par les professionnels de la planification.

- La formule du stock cible ne semble pas refléter la performance réelle en termes de niveau de stock. Des recherches plus précises doivent être menées pour vérifier les écarts et éventuellement proposer une alternative plus fiable.

Conclusion

Ce dernier chapitre avait pour but d'illustrer l'utilisation concrète du cadre méthodologique développé dans les Chapitre 3, 4 et 5 pour l'évaluation des PPC. L'exemple utilisé est celui de DDMRP, un PPC relativement nouveau qui suscite l'intérêt des industriels. Cette mise en œuvre dans le contexte réel de l'évaluation d'un PPC a montré la pertinence de notre méthodologie pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle offre des outils et méthodes cadrées qui ont permis de réaliser une étude traçable. Ensuite, le caractère adaptable a été vérifié car nous avons pu élaborer notre propre cheminement en fonction des objectifs et des résultats au fil des itérations. Enfin les résultats obtenus sont riches et contribuent à la compréhension de DDMRP. Nous avons choisi de présenter seulement certains éléments permettant de comprendre le fonctionnement du cadre proposé.

Nous avons, dans un 1^{er} temps, développé la totalité de la phase P0-caractérisation car elle constitue le point d'entrée de la méthodologie proposée. Elle permet à l'utilisateur de s'approprier les concepts du PPC et d'orienter les phases suivantes. La phase de caractérisation a fait émerger 4 questions principales : le contexte industriel, le placement des buffers, la performance quantitative et la performance qualitative. La réponse à ces questions est traitée tout au long de l'utilisation du cadre méthodologique et est intégrée dans les livrables concernés, respectivement D2, D3, D4 et D5.

Nous avons, par la suite, illustré la phase P1-étude qualitative à travers l'exemple de l'itération P1-5 Survey de 88 études de cas. Cet exemple nous a permis de conclure à l'absence d'un contexte industriel ou d'un profil-type particulièrement adapté à DDMRP et de confirmer les performances quantitatives sur les résultats présentés. Cependant le manque de complétude des informations ne permet pas de valider sur la totalité des cas. Cette itération participe aux livrables D1 Périmètre décisionnel, D2 Grille des Caractéristiques et D4 Analyse des indicateurs.

La phase P2 a été présentée à travers l'instanciation du modèle de simulation et l'illustration de son utilisation grâce à l'itération P2-9 POC-Seuil de pic. Ce cas a permis de démontrer l'impact du choix dans les options proposées pour fixer le seuil de pic. Il en ressort que le choix fait par défaut par les utilisateurs (50% de la zone rouge) conduit, dans cet exemple, à une surélévation du stock de l'ordre de 34% par rapport aux 2 autres solutions, les 3 parvenant à un OTD parfait.

L'étude du placement des buffers a servi d'exemple de l'utilisation itérative du cadre méthodologique. Au total, ce sont 5 itérations qui ont été réalisées sur cette question et qui ont apporté des éléments concrets pour les livrables D3 et D6 notamment en termes de recommandations et de pistes de réflexion.

Enfin, nous avons présenté partiellement D6 Conclusions et Recommandations qui constitue la synthèse de l'évaluation de la performance réalisée grâce au cadre méthodologique. Concernant DDMRP, les résultats sont riches pour l'ensemble des livrables et les pistes de réflexions sont nombreuses. Ce PPC apporte indéniablement des avantages mais les différentes expérimentations ont également démontré l'importance du paramétrage dans la performance. Nous avons notamment pu relever l'impact majeur du DLT, lié au

placement des buffers, du seuil de pic, du coefficient de variabilité. Nous avons également mis en évidence une taille de lot bien supérieure à la demande, malgré l'attention portée au paramétrage, qui n'est pas toujours compatible avec l'organisation industrielle. Enfin, DDMRP est un PPC centré sur le niveau de décision opérationnel. Il ne comporte pas d'outil de gestion de la capacité ce qui le rend dépendant des outils existants et poussent les entreprises utilisatrices à déployer les autres couches de DDAE ou à innover.

Ce Chapitre VI a été construit afin de démontrer l'utilisation effective du cadre méthodologique proposé dans les Chapitre III, Chapitre IV et Chapitre V. Le lecteur intéressé par DDMRP pourra se référer à l'[Annexe 4](#) soit pour lire l'étude complète avec l'ensemble des itérations, soit pour consulter certains livrables qui l'intéresse.



Conclusion générale

Rappel du contexte

L'environnement économique est souvent caractérisé par l'acronyme VUCA (Volatile, Incertain, Complexe et Ambigu) pour décrire les fortes perturbations qu'il subit. Les conséquences sur les entreprises industrielles sont fortes et remettent parfois en cause les modèles de décisions existants. Il incite donc les entreprises à investiguer de nouvelles solutions pour maintenir ou améliorer leur performance dans ce contexte fortement variable. Dans ce cadre, nous nous sommes demandés **quelles étaient les solutions potentielles pour faire face à l'incertitude et comment aider les décideurs dans le choix d'une solution adaptée permettant de préserver la performance du système.**

Parmi les solutions étudiées, l'adaptation des systèmes de pilotage de la production (Production Planning and Control systems ou PPC) offre une alternative intéressante car elle offre une approche systémique, susceptible d'apporter des solutions à chaque niveau décisionnel. Il est admis que les PPC doivent être adaptés au contexte industriel. Cependant la revue de littérature a montré que les PPC existants sont adaptés à plusieurs types de contextes industriels ce qui laisse supposer que d'autres critères sont à considérer pour l'arbitrage final. La performance liée à leur paramétrage et la performance qualitative, c'est-à-dire l'expérience des utilisateurs, pourraient apporter un complément d'information intéressant. Il paraît donc essentiel de pouvoir **évaluer la performance des PPC de façon globale et d'en offrir une vision la plus objective possible.** Cela permettrait **d'aider les entreprises** tant dans le cas des PPC existants, que dans le cas des PPC émergents. Dans ce second cas, il est rare de disposer de l'information nécessaire au choix car les informations sont souvent parcellaires, limitées aux aspects quantitatifs et orientées. Néanmoins, il n'existe pas d'outils permettant de réaliser cette évaluation globale.

Le travail de cette thèse avait pour but de créer un cadre méthodologique pour l'évaluation des PPC afin de les comprendre, les positionner et les évaluer globalement. L'outil conduit à la rédaction d'un rapport d'analyse qui offre une **vision objective et globale de la performance** du PPC considéré. Afin de valider la proposition méthodologique, le cadre a été testé sur le cas du Demand Driven Material Requirement Planning. Ce test, réalisé dans le cadre d'un **contrat d'étude**, a permis de produire un rapport d'analyse complet permettant de valider la proposition.

Bilan des contributions

Le travail réalisé a permis de créer un cadre méthodologique pour l'évaluation globale des PPC. La principale originalité de la proposition réside dans **l'approche croisée entre évaluation qualitative et quantitative.** La plupart des grilles proposées repose sur la dimension quantitative de la performance, sans considérer les avantages et les inconvénients liées à l'implantation ou à l'utilisation d'un PPC. L'intégration de la performance qualitative basée sur des retours d'expériences de plusieurs sources apporte la vision des utilisateurs sur l'ensemble des étapes de l'intégration d'un PPC (choix, implantation et utilisation).

Du point de vue quantitatif, nous avons développé un modèle de simulation architecturé autour des 2 composants : un système de gestion de base de données et un simulateur à événements discret. Il permet d'évaluer les PPC différents avec un **modèle paramétrable.** Il supporte les données des cas in-vivo ou in-vitro en permettant des allers-retours entre les types d'expérimentations. L'avantage est que les différents plans

d'expériences peuvent être menés avec le même environnement de modélisation-simulation ce qui facilite la comparaison des résultats.

Du point de vue de l'exploitation du cadre méthodologique, nous avons opté pour **une approche itérative** entre les types les phases Qualitative et Quantitative permettant un **croisement des résultats**. Cette approche n'est pas commune et la plupart du temps, il faut étudier plusieurs travaux pour comprendre l'origine des conclusions. Dans notre cadre, la traçabilité des itérations et des résultats qui en émanent est conservée dans les différents livrables.

Enfin le cadre méthodologique proposé est un **cadre adaptable** d'évaluation des PPC. Par conséquent, il peut servir pour une évaluation complète d'un nouveau PPC ou bien être utilisé pour apporter des compléments sur des PPC déjà connus.

Si l'approche elle-même est effectivement originale, elle comporte également des apports en termes d'outils. En effet, pour chaque livrable un outil de synthèse a été développé. Trois outils sont particulièrement originaux :

- **Un guide thématique pour l'évaluation qualitative des PPC** : nous avons regroupés au sein de ce guide l'ensemble des thématiques qui nous ont paru pertinentes pour l'évaluation qualitative des PPC. Ce guide sert de base à l'exploitation des retours d'expérience et permet de les formaliser sans limiter le chercheur et les répondants dans leurs échanges.
- **Une définition du périmètre fonctionnel** des PPC différenciant les processus récurrents des processus ponctuels. Cet outil permet de situer le champ d'action du PPC étudié par rapport à l'ensemble des processus existants et donc de situer les besoins complémentaires. L'outil permet également de comparer les PPC les uns aux autres.
- **Une grille des caractéristiques du PPC et de son contexte Industriel** permettant un tableau de synthèse de caractériser le PPC et l'environnement industriel dans lequel il est pertinent. Cette grille met également en évidence les limitations du PPC.

L'ensemble du cadre méthodologique et des outils proposés constituent une base méthodologique que nous espérons robuste afin que n'importe quel utilisateur puisse l'utiliser pour l'évaluation de la performance qualitative et quantitative d'un PPC.

Perspectives de recherche

Si le travail de recherche réalisé a apporté des éléments de réponse à la question de recherche, il a également ouvert un certain nombre de perspectives.

Du point de vue de cadre méthodologique développé, de nouvelles fonctionnalités pourraient être apportées. Tout d'abord concernant le cadre méthodologique général :

- **Contexte d'étude VUCA** : dans ce travail nous avons investigué l'incertitude au sens large générée par le contexte VUCA. Il pourrait être intéressant d'approfondir l'approche en caractérisant plus précisément les contraintes issues de chaque initiale de l'acronyme. Cette distinction permettrait d'affiner le modèle existant mais également de proposer des approches scientifiques complémentaires en fonction des types d'incertitude rencontrés. Ainsi l'absence de données pourrait donner lieu à un couplage avec une approche d'optimisation robuste.
- **Périmètre de l'étude** : le modèle est centré sur l'étude d'un modèle de supply chain à 2 échelons centré sur une seule entreprise avec 1 échelon fournisseur en amont et un échelon client en aval. L'intégration d'une vision multi-échelle permettrait d'évaluer la performance au-delà du périmètre de l'entreprise. Du point de vue quantitatif, il est possible que les choix réalisés par l'entreprise aient un impact sur les systèmes productifs et logistiques de maillons amont, il serait intéressant de les intégrer à la réflexion. Du point de vue qualitatif, la consultation des parties prenantes en amont et en aval permettrait d'incorporer leurs retours d'expériences sur l'amélioration ou la dégradation des relations avec l'entreprise utilisatrice du PPC.

- **Mesure de la performance** : nous avons choisi de nous appuyer sur le modèle Qualité-Coût-Délai (QCD) pour définir nos indicateurs performance. La validité de ce choix a été discutée dans le chapitre 2 et la possibilité d'intégrer des indicateurs complémentaires dans ce modèle a été évoquée. Ainsi, il pourrait être intéressant d'ajouter dans ce modèle des aspects complémentaires tels que :
 - o **la dimension environnementale** au travers d'une thématique supplémentaire à intégrer dans le guide et d'indicateurs spécifiques. Cette dimension devient capitale face à la crise énergétique et plus généralement face aux enjeux climatiques. L'impact des choix émanant du périmètre fonctionnel des PPC, notamment concernant l'ordonnancement, peut s'avérer important en termes de consommation énergétique. Dès lors l'intégration de cette dimension pourrait permettre d'évaluer l'impact environnementale des PPC et donc aider les entreprises dans leur choix pour agir en lien avec l'objectif 13 des ODD définis pour l'ONU à savoir « agir pour arrêter le réchauffement climatique ». Le simulateur est d'ores et déjà capable d'utiliser des paramètres liés à l'ordonnancement mais il devra être adapté en intégrant de nouvelles modalités et une réflexion autour des indicateurs de performance à utiliser devra être menée.
 - o **La dimension sociale** : elle est actuellement intégrée au sien de D5-Analyse bénéfiques –risques mais elle pourrait faire l'objet d'une évaluation quantifiée. Cela demandera, là encore, une réflexion autour du choix des indicateurs et de leur mode de collecte.

Du point de vue des différentes phases proposées des extensions pourraient être ajoutées. Pour P0, il s'agit davantage d'aménagement. En effet, la réalisation d'une revue de littérature systématique pour des PPC existants et largement étudiés pourrait être problématique. Il faudra probablement restreindre le périmètre des recherches en fonction du processus PPC concerné et/ou d'une version particulière de son utilisation.

Concernant la phase P1- Étude qualitative, des améliorations peuvent être apportées notamment du point de vue de **la méthodologie employée** : l'objectif du cadre méthodologique est avant tout exploratoire. On peut imaginer étendre la démarche en ajoutant une composante à notre cadre méthodologique qui inclurait une phase de validation par questionnaires. Cela suppose le développement d'un questionnaire standard à questions fermées dans le cadre de l'évaluation des PPC qui permettrait de centraliser les retours d'expérience de façon plus complète et objective.

Sur la phase P2-étude quantitative, plusieurs améliorations pourraient être apportées et constitueraient des pistes de recherche futures :

- Sur le modèle de simulation :
 - o **Réaliser une modélisation formelle** : la modélisation utilisée dans ce travail est basée sur une modélisation supply chain simplifiée. L'utilisation d'une modélisation plus formelle avec un langage dédié permettrait de faciliter les développements futurs pour l'intégration d'autres PPC.
 - o **Périmètres considérés** : comme évoqué plus haut, la prise en compte de plusieurs maillons de la SC permettrait de vérifier la performance quantitative sur plusieurs échelons de la supply chain ce qui nécessiterait de nouveaux développements dans le modèle. Par exemple, il serait intéressant d'intégrer des cas multi produits ou d'étendre la démarche mono produit à l'évaluation de la performance dans le cadre d'une supply chain multi échelons. Le simulateur est seulement contraint par la lenteur des calculs et non par des limitations techniques. Du point de vue de l'incertitude, un couplage d'autres méthodes quantitatives couplées avec le modèle de simulation pourrait notamment permettre la création de nouveaux scénarii à tester...
 - o **Prise en compte de l'incertitude** : nous avons modélisé l'incertitude via des lois uniformes générant la perturbation des délais d'approvisionnement, des temps opératoires et de la quantité demandée par les clients. Cette prise en compte pourrait être enrichie avec de nouveaux paramètres au sein du modèle de simulation (ex : loi de pannes, taux de rebut).
 - o **Développement de plans d'expériences standards** : dans l'optique de comparer les PPC du point de vue de la performance quantitative, des plans d'expériences standard pourraient être développés. Nous avons d'ores et déjà créé des sets de scénarii de la demande et un

échantillon de nomenclatures aléatoires. Cependant, ce travail pourrait être étendu aux paramètres caractérisant le contexte industriel (cf. grille des caractéristiques).

Par ailleurs, le travail pourrait trouver de nouvelles extensions. En effet, dans l'étude quantitative, nous nous sommes focalisés sur plusieurs aspects, notamment sur la recherche d'impact des paramètres sur la performance. Cependant, nous n'avons pas cherché à **caractériser ou quantifier l'intensité de ces impacts**. Il pourrait être intéressant d'approfondir les recherches de ce point de vue, afin d'intégrer des outils permettant d'améliorer la compréhension des impacts des éléments constitutifs du PPC sur sa performance.

Du point de vue de l'exploitation des résultats, l'intégration de **l'optimisation multicritères** pourrait offrir de nouvelles pistes de réflexions. En effet, l'exemple de DDMRP a fait apparaître la notion de compromis entre les indicateurs OTD et niveau de stock. Ce constat qui est classique des PPC, confirme l'intérêt d'ajouter une couche « optimisation » dans la phase quantitative. Elle pourrait permettre d'affiner l'analyse de la performance mais également de faire des propositions de paramétrage des éléments constitutifs en fonction des objectifs. Dans la logique d'adaptabilité du cadre proposé, il s'agira de définir les objectifs et les scénarii ainsi que la méthodologie à utiliser, les paramètres à optimiser dépendant du PPC étudié.

Au-delà de l'évolution du cadre méthodologique, d'autres pistes de recherche sont ouvertes concernant l'évaluation des PPC, deux perspectives principale s'ouvrent. Premièrement, il pourrait être intéressant **d'utiliser le cadre méthodologique sur d'autres PPC récents** afin d'offrir une évaluation objective de leur performance et de les positionner par rapport aux caractéristiques du contexte industriel. Plus d'une douzaine de PPC créés depuis les années 2000 ont été recensés, le travail est donc important et il est utopique de penser réaliser ces évaluations à court terme. Cependant le travail ciblé sur les PPC prometteurs en termes de résultats industriels et académiques pourrait être intéressant. Deuxièmement, étant donnés les changements imposés par le contexte VUCA, il pourrait être utile de **réévaluer les PPC existants** et donc de réaliser des études utilisant le cadre pour positionner/repositionner leur contexte de performance. Plus généralement, la **création d'un outil d'aide à la décision** basé sur les caractéristiques du contexte industriel identifiées dans ces travaux et permettant de visualiser le **positionnement relatif des PPC** présenterait un intérêt.

Ce travail a focalisé la **réponse aux incertitudes** dans les entreprises industrielles uniquement sur l'aspect choix du PPC. Or il est clair que **d'autres approches** peuvent être mobilisées pour y faire face. De nombreux travaux ont été identifiés dans le [Chapitre II](#) et leur exploitation pourrait également fournir des réponses adéquates. Par ailleurs, la **gestion de l'incertitude dans les systèmes de planification** peut trouver des extensions dans **d'autres domaines applicatifs** que celui de la production industrielle.

Perspectives Industrielles

Le travail réalisé dans le cadre de l'évaluation de la performance des PPC constitue une aide à la décision pour les entreprises. Il a notamment apporté des éléments de réponses concernant DDMRP consultables en [Annexe 4](#). Des travaux complémentaires pourraient être réalisés afin de traiter les points soulevés dans le livrable D6. Par ailleurs, un travail additionnel pourrait, à l'avenir, fournir une grille de positionnement des PPC par rapport au contexte VUCA et ainsi offrir un outil d'aide à la décision englobant les principaux PPC.

Enfin, le simulateur créé dans le cadre de ce travail pourrait constituer un outil d'aide à la décision afin d'évaluer les paramétrages de PPC les plus adaptés dans le contexte d'une entreprise. Cependant, l'opérationnalisation nécessitera quelques développements supplémentaires afin d'améliorer l'interface utilisateurs et les temps de calculs.



Au-delà des résultats obtenus, l'ensemble des perspectives issues de ce travail est riche. Elles permettront de dégager de nouveaux sujets de recherche dans le domaine des PPC et plus largement de l'évaluation de la performance. **Des projets ont d'ores et déjà été lancés.** Du côté de l'utilisation du cadre méthodologique, 2 travaux de masters ont été débutés : l'un pour **évaluer CONwip** et l'autre pour **approfondir les résultats obtenus pour DDMRP**. Du point de vue de la **planification**, des projets étudiants de 5^e année sont en cours de réalisation en partenariat avec des industriels du **génie civil et de la construction**. Nous espérons les voir déboucher sur projets de recherche à moyen terme avec la perspective de montage d'une thèse sur le sujet.



Bibliographie

- Achergui, A., Allaoui, H., Hsu, T., 2020. Strategic DDMRP's Buffer Positioning for hybrid MTO/MTS manufacturing, in: 2020 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). Presented at the 2020 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), IEEE, Marrakech, Morocco, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICTMOD49425.2020.9380588>
- Achergui, A., Hsu, T., Allaoui, H., 2021. Demand Driven Material Requirements Planning Buffer Positioning Considering Carbon Emissions, in: Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems, IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 460–468. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85906-0_51
- Aguilar-Savén, R.S., 2004. Business process modelling: Review and framework. *International Journal of Production Economics* 90, 129–149. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00102-6)
- Anil Kumar, S., Suresh, N., 2008. Production and operations management: (with skill development, caselets and cases). New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi.
- Ansoff, I., 1968. Stratégie du développement de l'entreprise, Hommes et Techniques. ed.
- Azzamouri, A., Baptiste, P., Dessevre, G., Pellerin, R., 2021. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP): A systematic review and classification. *JIEM* 14, 439. <https://doi.org/10.3926/jiem.3331>
- Azzamouri, A., Baptiste, P., Pellerin, R., Dessevre, G., 2022. Impact of the continuous and periodic assessment of a buffer replenishment on the DDMRP method. *International Journal of Production Research* 1–22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2109219>
- Azzone, G., Masella, C., Bertelè, U., 1991. Design of Performance Measures for Time-based Companies. *International Journal of Operations & Production Management* 11, 77–85. <https://doi.org/10.1108/01443579110143412>
- Bagni, G., Godinho Filho, M., Thürer, M., Stevenson, M., 2021. Systematic review and discussion of production control systems that emerged between 1999 and 2018. *Production Planning & Control* 32, 511–525. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1742398>
- Bahu, B., Bironneau, L., Hovelaque, V., 2019. Compréhension du DDMRP et de son adoption : premiers éléments empiriques. *Logistique & Management* 1–13. <https://doi.org/10.1080/12507970.2018.1547130>
- Bahu, B., Bironneau, L., Hovelaque, V., Vigouroux, L., 2018. LE DDMRP: PREMIERS ÉLÉMENTS EMPIRIQUES DE COMPRÉHENSION DE SON CHOIX ET DE SON FONCTIONNEMENT. Presented at the Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique et Supply Chain Management (RIRL), Paris, p. 23.
- Balci, O., 2012. A life cycle for modeling and simulation. *SIMULATION* 88, 870–883. <https://doi.org/10.1177/0037549712438469>
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L., Nicol, D.M., 2014. Discrete-event system simulation, 5. ed., new internat. ed. ed, Always learning. Pearson, Harlow.
- Baptiste, P., Pellerin, R., 2018. Planification à court terme dans un système de production complexe géré en DDMRP. Presented at the MOSIM 2018, Toulouse, France, p. 8.
- Bayard, S., Delorme, X., Grimaud, F., 2020a. DMRP vs MRP2 : impacts of choice on financial and customer performance facing different demand profiles, in: Twenty-First International Working Seminar on Production Economics. Universität Innsbruck, Innsbruck, Austria.

- Bayard, S., Grimaud, F., 2018. Enjeux financiers de DDMRP : Une approche simulateur. Presented at the 12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation- MOSIM'18, Toulouse, France.
- Bayard, S., Grimaud, F., Delorme, X., 2021. Study of buffer placement impacts on Demand Driven MRP performance. *IFAC-PapersOnLine* 54, 1005–1010. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.119>
- Bayard, S., Grimaud, F., Delorme, X., 2020b. Discrete Event Simulation framework for Demand Driven MRP performances evaluation, in: A, N., C, B., C, F. (Trans.), 34th Annual European Simulation and Modelling Conference (ESM 2020). Toulouse, France, pp. 131–138.
- Ben-Tal, A., El Ghaoui, L., Nemirovskiĭ, A.S., 2009. Robust optimization, Princeton series in applied mathematics. Princeton University Press, Princeton.
- Berrah, L., Mauris *, G., Vernadat, F., 2004. Information aggregation in industrial performance measurement: rationales, issues and definitions. *International Journal of Production Research* 42, 4271–4293. <https://doi.org/10.1080/00207540410001716534>
- Berrah, L., Mauris, G., Haurat, A., Foulloy, L., 2000. Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach. *Computers in Industry* 43, 211–225. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(00\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(00)00070-1)
- Berry, W.L., Hill, T., 1992. Linking Systems to Strategy. *International Journal of Operations & Production Management* 12, 3–15. <https://doi.org/10.1108/01443579210017204>
- Bertalanffy, L. von, 2012. Théorie générale des systèmes, Idem. Dunod, Paris.
- Bhamu, J., Singh Sangwan, K., 2014. Lean manufacturing: literature review and research issues. *International Journal of Operations & Production Management* 34, 876–940. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>
- Bironneau, L., 2002. Proposition d'un modèle d'aide au choix des méthodes et des outils de pilotage de la production en milieu industriel. *RFGI* 21, 29–53. <https://doi.org/10.53102/2002.21.01.419>
- Bititci, U.S., 1994. Measuring Your Way to Profit. *Management Decision* 32, 16–24. <https://doi.org/10.1108/00251749410065088>
- Bititci, U.S., Carrie, A.S., McDevitt, L., 1997. Integrated performance measurement systems: a development guide. *International Journal of Operations & Production Management* 17, 522–534. <https://doi.org/10.1108/01443579710167230>
- Bonney, M., 2000. Reflections on production planning and control (PPC). *Gest. Prod.* 7, 181–207. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2000000300002>
- Bonney, M.C., Zhang, Z., Head, M.A., Tien, C.C., Barson, R.J., 1999. Are push and pull systems really so different? *International Journal of Production Economics* 59, 53–64. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00094-2)
- Bonvik, A.M., Couch, C.E., Gershwin, S.B., 1997. A comparison of production-line control mechanisms. *International Journal of Production Research* 35, 789–804. <https://doi.org/10.1080/002075497195713>
- Bortolini, M., Galizia, F.G., Mora, C., 2018. Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems* 49, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
- Bosman, P.A.N., 2007. Learning and Anticipation in Online Dynamic Optimization, in: Yang, S., Ong, Y.-S., Jin, Y. (Eds.), *Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments*, Studies in Computational Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 129–152. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49774-5_6
- Bourguignon, A., 1992. Peut-on définir la performance ? *Revue Française de Comptabilité* 266, 61–66.

- Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S.P., Stecke, K.E., 1984. Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS magazine* 2, 114–117.
- Butturi, M.A., De Rosa, G., Balugani, E., Gamberini, R., 2021. Understanding the Demand Driven Material Requirements Planning Scope of Application: a Critical Literature Review, in: Katalinic, B. (Ed.), *DAAAM Proceedings*. DAAAM International Vienna, pp. 0462–0471. <https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.067>
- Buzacott, J., 1982. *The Fundamental Principles of Flexibility in Manufacturing Systems*. [No source information available].
- Carson, J.S., 2005. Introduction to Modeling and Simulation, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005*. Presented at the Winter Simulation Conference, 2005., IEEE, Orlando, FL. USA, pp. 16–23. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>
- Carson, Y., Maria, A., 1997. Simulation optimization: methods and applications, in: *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation - WSC '97*. Presented at the the 29th conference, ACM Press, Atlanta, Georgia, United States, pp. 118–126. <https://doi.org/10.1145/268437.268460>
- Chan, F.T.S., 2001. Effect of kanban size on just-in-time manufacturing systems. *Journal of Materials Processing Technology* 116, 146–160. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01022-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01022-6)
- Chan, J.W.K., Burns, N.D., 2002. Benchmarking manufacturing planning and control (MPC) systems: An empirical study of Hong Kong supply chains. *Benchmarking: An International Journal* 9, 256–277. <https://doi.org/10.1108/14635770210429018>
- Chapman, S.N., 2006. *The fundamentals of production planning and control*. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Cheraghlikhani, A., Khoshalhan, F., Mokhtari, H., 2019. Aggregate production planning: A literature review and future research directions. *10.5267/j.ijiec* 309–330. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.6.002>
- Chibani, A., Delorme, X., Dolgui, A., Pierreval, H., 2018. Dynamic optimisation for highly agile supply chains in e-procurement context. *International Journal of Production Research* 56, 5904–5929. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1458164>
- Cross, K.F., Lynch, R.L., 1988. The “SMART” way to define and sustain success. *Natl. Prod. Rev.* 8, 23–33. <https://doi.org/10.1002/npr.4040080105>
- Cruz, C., González, J.R., Pelta, D.A., 2011. Optimization in dynamic environments: a survey on problems, methods and measures. *Soft Comput* 15, 1427–1448. <https://doi.org/10.1007/s00500-010-0681-0>
- Damand, D., Lahrichi, Y., Barth, M., 2022. Parameterisation of demand-driven material requirements planning: a multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Production Research* 1–22. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2098074>
- de Rosnay, J., 1975. *Le microscope: vers une vision globale*. Éditions du Seuil, Paris.
- Dessevre, G., Baptiste, P., Lamothe, J., 2020a. Corrélation entre taux de service, taux de charge et paramètres du DDMRP: utilisation d’abaques réalisés par simulation. Presented at the International Conference of the European 13ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation-MOSIM’20, AGADIR (virtual), Morocco, p. 7.
- Dessevre, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Pellerin, R., 2021. Visual charts produced by simulation to correlate service rate, resource utilization and DDMRP parameters. *International Journal of Production Research* 1–13. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2015808>
- Dessevre, G., Lamothe, J., Pomponne, V., Baptiste, P., Lauras, M., Pellerin, R., 2020b. A DDMRP implementation user feedbacks and stakes analysis. Presented at the 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Austin, USA, p. 9.

- Dessevre, Guillaume, Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Lauras, M., 2019a. Étude d'impact du paramétrage des temps de défilement sur la performance d'un déploiement de la méthode DDMRP. Presented at the CIGI QUALITA 2019, Montreal, Quebec, Canada, p. 11.
- Dessevre, G., Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Pellerin, R., Lauras, M., 2019. Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: a feedback loop approach, in: 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). Presented at the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948198>
- Dessevre, Guillaume, Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Pellerin, R., Lauras, M., 2019b. Decoupled Lead Time in finite capacity flowshop: a feedback loop approach, in: 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). Presented at the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), IEEE, Shanghai, China, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948198>
- Dohou, A., Berland, N., 2010. MESURE DE LA PERFORMANCE GLOBALE DES ENTREPRISES 22.
- Doumeingts, G., 1984. Méthode GRAI: méthode de conception des systèmes en productique. Bordeaux I.
- Ducrot, L., Ahmed, E., 2019. Investigation of potential added value of DDMRP in planning under uncertainty at finite capacity (master). MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- Erraoui, Y., Charkaoui, A., Echchatbi, A., 2019. Demand Driven DRP: Assessment of a New Approach to Distribution. IJSSOM 6. <https://doi.org/10.22034/2019.1.1>
- Farissi, A., Driouach, L., Zarbane, K., Oumami, M.E., Beidouri, Z., 2021. Covid-19 Impact on Moroccan Small and Medium-Sized Enterprises: Can Lean Practices Be an Effective Solution for Getting Out of Crisis? Management Systems in Production Engineering 29, 83–90. <https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0011>
- Favaretto, D., Marin, A., Tolotti, M., 2021. A data-driven and risk-based prudential approach to validate the DDMRP planning and control system. SSRN Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3965617>
- Fisher, M., 1997. What Is the Right Supply Chain for Your Product? Harvard Business Review 75.
- Fitzgerald, L., 1988. Management Performance Measurement in Service Industries. International Journal of Operations & Production Management 8, 109–116. <https://doi.org/10.1108/eb054830>
- Folan, P., Browne, J., 2005. A review of performance measurement: Towards performance management. Computers in Industry 56, 663–680. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.03.001>
- Forrester, J.W., 1961. Industrial dynamics, Students' ed., 8. print. ed. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Franco-Santos, M., Kennerley, M., Micheli, P., Martinez, V., Mason, S., Marr, B., Gray, D., Neely, A., 2007. Towards a definition of a business performance measurement system. International Journal of Operations & Production Management 27, 784–801. <https://doi.org/10.1108/01443570710763778>
- Fu, H., Lewis, P.R., Sendhoff, B., Tang, K., Yao, X., 2014. What are dynamic optimization problems?, in: 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Presented at the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, Beijing, China, pp. 1550–1557. <https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900316>
- Fu, M.C., Glover, F.W., April, J., 2005. Simulation Optimization: A Review, New Developments, and Applications, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005. Presented at the Winter Simulation Conference, 2005., IEEE, Orlando, FL. USA, pp. 83–95. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574242>
- Gerwin, D., 1993. Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. Management Science 39, 395–410. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.4.395>
- Globerson, S., 1985. Issues in developing a performance criteria system for an organization. International Journal of Production Research 23, 639–646. <https://doi.org/10.1080/00207548508904734>

- Godinho Filho, M., Veloso Saes, E., 2013. From time-based competition (TBC) to quick response manufacturing (QRM): the evolution of research aimed at lead time reduction. *Int J Adv Manuf Technol* 64, 1177–1191. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4064-9>
- Goldratt, E.M., Cox, J., 1993. *Le but*, Maintenance-gestion de production. AFNOR, Paris.
- Granda, T.C.S., 2017. Caracterización y análisis de un sistema logístico híbrido y su efecto en la planeación de la producción de una empresa de calzado ubicada en la ciudad de Yumbo (master).
- Grieves, M., Vickers, J., 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer International Publishing, Cham, pp. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Grünwald, H., Striekwold, P.E.T., Weeda, P.J., 1989. A framework for quantitative comparison of production control concepts. *International Journal of Production Research* 27, 281–292. <https://doi.org/10.1080/00207548908942547>
- Guide, V.D.R., Srivastava, R., 2000. A review of techniques for buffering against uncertainty with MRP systems. *Production Planning & Control* 11, 223–233. <https://doi.org/10.1080/095372800232199>
- Gupta, M., Snyder, D., 2009. Comparing TOC with MRP and JIT: a literature review. *International Journal of Production Research* 47, 3705–3739. <https://doi.org/10.1080/00207540701636322>
- Gupta, Y.P., Goyal, S., 1989. Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements. *European Journal of Operational Research* 43, 119–135. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90206-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90206-3)
- Hoekstra, S., Romme, J., Argelo, S.M. (Eds.), 1992. *Integral logistic structures: developing customer-oriented goods flow*. Industrial Press, New York.
- Hopp, W.J., Spearman, M.L., 2011. *Factory physics*, 3rd ed. ed. Waveland Press, Long Grove, Ill.
- Hopp, W.J., Spearman, M.L., 2004. To Pull or Not to Pull: What Is the Question? *M&SOM* 6, 133–148. <https://doi.org/10.1287/msom.1030.0028>
- Ihme, M., Stratton, R., 2015. Evaluating Demand Driven MRP: a case based simulated study. Presented at the International Conference of the European Operations Management Association, Neuchatel, Switzerland, p. 10.
- Jacobs, F.R., Berry, W.L., Whybark, D.C., Vollmann, T.E. (Eds.), 2011. *Manufacturing planning and control for supply chain management*, 6. ed., internat. ed. ed, The McGraw-Hill/Irwin series in operations and decision sciences. McGraw Hill Higher Education, New York, NY.
- Jaegler, Y., Jaegler, A., Burlat, P., Lamouri, S., Trentesaux, D., 2018. The ConWip production control system: a systematic review and classification. *International Journal of Production Research* 56, 5736–5757. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1380325>
- Jeon, S.M., Kim, G., 2016. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). *Production Planning & Control* 27, 360–377. <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1128010>
- Jiang, J., Rim, S.-C., 2017. Strategic WIP Inventory Positioning for Make-to-Order Production with Stochastic Processing Times. *Mathematical Problems in Engineering* 2017, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/8635979>
- Jiang, J., Rim, S.-C., 2016. Strategic Inventory Positioning in BOM with Multiple Parents Using ASR Lead Time. *Mathematical Problems in Engineering* 2016, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/9328371>
- Jodlbauer, H., Huber, A., 2008. Service-level performance of MRP, kanban, CONWIP and DBR due to parameter stability and environmental robustness. *null* 46, 2179–2195. <https://doi.org/10.1080/00207540600609297>
- Johansson, R., Södermark, G., 2019. Understanding the Requirements of Forecast in Demand Driven Material Requirements Planning. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, Sweden.

- Kaplan, R.S., Norton, D.P., 1992. The balanced scorecard--measures that drive performance. *Harvard business review* 70, 71–79.
- Keegan, D. P., Eiler, R. G., Jones, C. R., 1989. Are your performance measures obsolete? *Management Accounting* 45–50.
- Kelton, W.D., Sadowski, R.P., Zupick, N.B., 2015. *Simulation with Arena*, 6. ed., internat. student ed. ed. McGraw-Hill Education, New York, NY.
- Kiran, D.R., 2019. *Production planning and control: a comprehensive approach*. Butterworth-Heinemann, Amsterdam.
- Kitchenham, B., 2004. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University* 33, 1–26.
- Kochhar, A., McGarrie, B., 1992. Identification of the Requirements of Manufacturing Control Systems: A Key Characteristic Approach. *Integrated Mfg Systems* 3, 4–15. <https://doi.org/10.1108/09576069210018916>
- Koren, Y., Gu, X., Guo, W., 2018. Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Front. Mech. Eng.* 13, 121–136. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>
- Koren, Y., Moriwaki, T., 1999. Reconfigurable Manufacturing Systems. *Keynote Papers* 14.
- Koren, Yoram., 2010. *The global manufacturing revolution : product-process-business integration and reconfigurable systems*. Wiley, Hoboken.
- Kouvelis, P., Yu, G., 1997. *Robust Discrete Optimization and Its Applications, Nonconvex Optimization and Its Applications*. Springer US, Boston, MA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2620-6>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W., 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51, 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Ladier, A.-L., Greenwood, A.G., Alpan, G., Hales, H., 2014. Issues in the complementary use of simulation and optimization modeling.
- Law, A.M., 2013. *Simulation modeling and analysis*, Fifth edition. ed, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. McGraw-Hill Education, Dubuque.
- Le Moigne, J.-L., 2011. *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod, Paris.
- Lee, C.-J., Rim, S.-C., 2019. A Mathematical Safety Stock Model for DDMRP Inventory Replenishment. *Mathematical Problems in Engineering* 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/6496309>
- Lepagnot, J., Nakib, A., Oulhadj, H., Siarry, P., 2009. Performance Analysis of MADDO Dynamic Optimization Algorithm, in: *2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. Presented at the 2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, IEEE, Pisa, Italy, pp. 37–42. <https://doi.org/10.1109/ISDA.2009.35>
- Lian, Y.-H., Van Landeghem, H., 2007. Analysing the effects of Lean manufacturing using a value stream mapping-based simulation generator. *International Journal of Production Research* 45, 3037–3058. <https://doi.org/10.1080/00207540600791590>
- Little, J.D.C., 1961. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. *Operations Research* 9, 383–387.
- Lödging, H., 2013. *Handbook of Manufacturing Control*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24458-2>
- Lugan, J.-C., 2009. La modélisation des systèmes complexes chez E. Morin et J.-L. Le Moigne, in: *Que sais-je ? Presses Universitaires de France, Paris cedex 14*, pp. 99–116.
- Maccarthy, B.L., Fernandes, F.C.F., 2000. A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning & Control* 11, 481–496. <https://doi.org/10.1080/09537280050051988>

- Manu, G., Vijay Kumar, M., Nagesh, H., Jagadeesh, D., Gowtham, M.B., 2018. Flexible Manufacturing Systems (FMS), A Review. *IJMPERD* 8, 323–336. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201836>
- Maria, A., 1997. Introduction to Modeling and Simulation, in: *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation*. Presented at the Winter Simulation Conference, p. 7. <https://doi.org/doi.org/10.1145/268437.268440>
- Martin, G., 2020. *Contrôle dynamique du Demand Driven Sales and Operations Planning*. IMT-Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmau.
- Martin, G., Lauras, M., Baptiste, P., Lamothe, J., Fouqu, A., Miclo, R., 2019. Process control and decision-making for Demand Driven Sales and Operations Planning, in: *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Presented at the 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), IEEE, Shanghai, China, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IESM45758.2019.8948077>
- Mason-Jones, R., Towill, D.R., 1999. Using the Information Decoupling Point to Improve Supply Chain Performance. *The International Journal of Logistics Management* 10, 13–26. <https://doi.org/10.1108/09574099910805969>
- Mavrovouniotis, M., Li, C., Yang, S., 2017. A survey of swarm intelligence for dynamic optimization: Algorithms and applications. *Swarm and Evolutionary Computation* 33, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.12.005>
- McCullen, P., Eagle, S., 2015. Demand-Driven innovation in material planning and control: a review of early implementations, in: *Reflections on Supply Chain Research and Practice*. Presented at the The Proceedings of 20th International Symposium on Logistics, Bologna, p. 8.
- Mcfarlane, D.C., Bussmann, S., 2000. Developments in holonic production planning and control. *Production Planning & Control* 11, 522–536. <https://doi.org/10.1080/095372800414089>
- Miclo, R., 2016. *Challenging the “Demand Driven MRP” Promises : a Discrete Event Simulation Approach (Thèse de doctorat de l’Université de Toulouse)*. France.
- Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B., 2016. An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. Presented at the 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016, IFAC-PapersOnLine, Troyes, pp. 1725–1730. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.831>
- Miclo, R., Fontanili, F., Lauras, M., Lamothe, J., Milian, B., 2015. MRP vs. demand-driven MRP: Towards an objective comparison, in: *2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Presented at the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), IEEE, Seville, Spain, pp. 1072–1080. <https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380288>
- Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., Melnyk, S.A., 2018. Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research* 1–16. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1464230>
- Miles, M.B., Huberman, A.M., 2017. *Analyse des données qualitatives*, 2e édition. ed. De Boeck Supérieur, Bruxelles.
- Morin, E., Savoie, A., Beaudin, G., 1994. *L’efficacité de l’organisation : théories, représentations et mesures*. G. Morin, Montréal Paris Casablanca.
- Mukhlis H.F, D., IndraEfrialdi, J., Rimawan, E., 2019. Inventory Management using Demand Driven Material Requirement Planning for Analysis Food Industry. *International Journal of Innovative Science and Research Technology* 4, 495–499.

- Mula, J., Poler, R., García-Sabater, J.P., Lario, F.C., 2006. Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics* 103, 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.09.001>
- Nam, S., Logendran, R., 1992. Aggregate production planning - A survey of models and methodologies 18.
- Neely, A., Gregory, M., Platts, K., 1995. Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management* 15, 80–116. <https://doi.org/10.1108/01443579510083622>
- Neely, A.D., Adams, C., Kennerley, M., 2002. The performance prism: the scorecard for measuring and managing business success. Financial Times Prentice Hall, Harlow.
- Negrão, L.L.L., Godinho Filho, M., Marodin, G., 2016. Lean practices and their effect on performance: a literature review. *Production Planning & Control* 1–24. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1231853>
- Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M., 2017. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Nguyen, T.T., Yang, S., Branke, J., 2012. Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation* 6, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2012.05.001>
- O’Grady, P.J., Menon, U., 1986. A concise review of flexible manufacturing systems and FMS literature. *Computers in Industry* 7, 155–167. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(86\)90037-0](https://doi.org/10.1016/0166-3615(86)90037-0)
- Ohno, T., 1989. *L’esprit Toyota, Productivité de l’entreprise*. Masson, Paris, Milan, Barcelone [etc.].
- Ohno, T., 1988. *Toyota production systems : beyond large - scale production*. Productivity Press, Cambridge, Mass.
- Olhager, J., 2003. Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics* 85, 319–329. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00119-1)
- Olhager, J., Selldin, E., 2007. Manufacturing planning and control approaches: market alignment and performance. *International Journal of Production Research* 45, 1469–1484. <https://doi.org/10.1080/00207540600635250>
- Olhager, J., Wikner, J., 2000. Production planning and control tools. *Production Planning & Control* 11, 210–222. <https://doi.org/10.1080/095372800232180>
- OMG, 2011. About the business process model and notation specification version 2.0.
- Orlicky, J., 1975. *Material requirements planning: the new way of life in production and inventory management*. McGraw-Hill, New York.
- Orue, A., Lizarralde, A., Kortabarria, A., 2020. Demand Driven MRP – The need to standardise an implementation process. *Int. J. Prod. Manag. Eng.* 8, 65. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.12737>
- Ouelhadj, D., Petrovic, S., 2009. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *J Sched* 12, 417–431. <https://doi.org/10.1007/s10951-008-0090-8>
- Pavnaskar, S.J., Gershenson, J.K., Jambekar, A.B., 2003. Classification scheme for lean manufacturing tools. *International Journal of Production Research* 41, 3075–3090. <https://doi.org/10.1080/0020754021000049817>
- Pekarcikova, M., Trebuna, P., Kliment, M., Trojan, J., 2019. Demand Driven Material Requirements Planning : some methodical and practical comments. *Management and Production Engineering Review* 10, 50–59. <https://doi.org/10.24425/MPER.2019.129568>
- Petri, C.A., 1962. *Kommunikation mit Automaten*. Schriften des Institutes für Instrumentelle Mathematik Bonn.
- Plossl, G.W., 1991. *Managing in the new world of manufacturing: how companies can improve operations to compete globally*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Porter, K., Little, D., Peck, M., Rollins, R., 1999. Manufacturing classifications: relationships with production control systems. *Integrated Mfg Systems* 10, 189–199. <https://doi.org/10.1108/09576069910280431>
- Ptak, C., 2018. *The demand driven adaptive enterprise (ddae): surviving, adapting, and thriving in a vuca (volatile, uncertain, complex, and ambiguous) world*. Industrial Press, Norwalk, CT.
- Ptak, C., Smith, C., 2011. *Orlicky's Material Requirement Planning*. McGraw-Hill Education.
- Ptak, C.A., Smith, C., 2019. *Demand driven material requirements planning (DDMRP): version 3*. Industrial Press, Inc, South Norwalk, Connecticut.
- Ptak, C.A., Smith, C., 2016. *Demand driven material requirements planning (DDMRP)*, Industrial Press, Inc. ed.
- Ravelomanantsoa, M.S., Ducq, Y., Vallespir, B., 2019. A state of the art and comparison of approaches for performance measurement systems definition and design. *International Journal of Production Research* 57, 5026–5046. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1506178>
- Reix, R., Fallery, B., Kalika, M., 2016. *Systèmes d'information et management des organisations*. Vuibert, Paris.
- Reynaud, E., 2003. *Développement durable et entreprise : vers une relation symbiotique ?* Presented at the Journée de l'AIMS sur le thème du développement durable, Angers.
- Riezebos, J., 2010. Design of POLCA material control systems. *International Journal of Production Research* 48, 1455–1477. <https://doi.org/10.1080/00207540802570677>
- Rim, S.-C., Jian, J., Ju Lee, C., 2014. Strategic Inventory Positioning for MTO Manufacturing Using ASR Lead Time, in: *Logistics Operations, Supply Chain Management and Sustainability*. Springer International Publishing, pp. 441–456.
- Roboam, M., Zanettin, M., Pun, L., 1989. GRAI-IDEF0-Merise (GIM): Integrated methodology to analyse and design manufacturing systems. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 2, 82–98. [https://doi.org/10.1016/0951-5240\(89\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0951-5240(89)90021-9)
- Robson, C., McCartan, K., 2016. *Real world research*. Wiley, Chichester.
- Rocky Newman, W., Sridharan, V., 1995. Linking manufacturing planning and control to the manufacturing environment. *Integrated Manufacturing Systems* 6, 36–42. <https://doi.org/10.1108/09576069510088952>
- Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D., 2015. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine* 48, 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Ross, 1985. Applications and Extensions of SADT. *Computer* 18, 25–34. <https://doi.org/10.1109/MC.1985.1662862>
- Ross, D.T., 1977. Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. *IEEE Trans. Software Eng. SE-3*, 16–34. <https://doi.org/10.1109/TSE.1977.229900>
- Sargent, R.G., 2010. Verification and validation of simulation models, in: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. Presented at the 2010 Winter Simulation Conference - (WSC 2010), IEEE, Baltimore, MD, USA, pp. 166–183. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5679166>
- Schragenheim, E., Ronen, B., 1990. Drum-buffer-rope shop floor control. *Production and inventory management* Washington, D.C. 31, 18–22.
- Schuh, G., Stich, V. (Eds.), 2012. *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25423-9>
- Sendil Kumar, C., Panneerselvam, R., 2007. Literature review of JIT-KANBAN system. *Int J Adv Manuf Technol* 32, 393–408. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0340-2>

- Shannon, R.E., 1998. Introduction to the art and science of simulation, in: 1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36274). Presented at the IEEE Winter Simulation Conference, IEEE, Washington, DC, USA, pp. 7–14. <https://doi.org/10.1109/WSC.1998.744892>
- Shapiro, A., Dentcheva, D., Ruszczyński, A., 2009. Lectures on Stochastic Programming: Modeling and Theory. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718751>
- Sharman, G., 1984. The rediscovery of logistics. *Harvard Business Review* 62, 71–79.
- Shofa, M.J., Moeis, A.O., Restiana, N., 2018. Effective production planning for purchased part under long lead time and uncertain demand: MRP Vs demand-driven MRP, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. p. 8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012055>
- Shofa, M.J., Widyarto, W.O., 2017. Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP. Presented at the GREEN PROCESS, MATERIAL, AND ENERGY: A SUSTAINABLE SOLUTION FOR CLIMATE CHANGE: Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering, Technology, and Industrial Application (ICETIA 2016), Surakarta, Indonesia, p. 020004. <https://doi.org/10.1063/1.4985449>
- Sinha, A., Ubale, S.S., 2020. Demand Driven Approach to Combat Nervousness of Auto Supply Chain in India. Presented at the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dubai, p. 7.
- Slack, N., 1987. The Flexibility of Manufacturing Systems. *Int Jrnl of Op & Prod Mngemnt* 7, 35–45. <https://doi.org/10.1108/eb054798>
- Spearman, M., Woodruff, D., Hopp, W., 1990. Conwip: A Pull Alternative to Kanban. *International Journal of Production Research - INT J PROD RES* 28, 879–894. <https://doi.org/10.1080/00207549008942761>
- Stalk, G.J., 1988. Time—The Next Source of Competitive Advantage. *Harvard Business Review* 41–51.
- Sterman, J.D., 1989. Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science* 35, 321–339.
- Stevenson, M., Hendry, L.C., Kingsman †, B.G., 2005. A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry. *International Journal of Production Research* 43, 869–898. <https://doi.org/10.1080/0020754042000298520>
- Suri, R., 1998. Quick response manufacturing: a companywide approach to reducing lead times. Productivity Press, Portland, Or.
- Suri, Rajan., 2010. It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing, Taylor and Francis Group,. ed. Productivity Press, New York.
- Tao, F., Zhang, M., 2017. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access* 5, 20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Tenhiälä, A., 2011. Contingency theory of capacity planning: The link between process types and planning methods. *Journal of Operations Management* 29, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2010.05.003>
- Thürer, M., Fernandes, N.O., Stevenson, M., 2020. Production planning and control in multi-stage assembly systems: an assessment of Kanban, MRP, OPT (DBR) and DDMRP by simulation. *International Journal of Production Research* 1–15. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1849847>
- Van Dierdonck, R., Miller, J.G., 1980. Designing production planning and control systems. *Journal of Operations Management* 1, 37–46. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(80\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0272-6963(80)90010-8)
- Velasco Acosta, A.P., Mascle, C., Baptiste, P., 2019. Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment. *International Journal of Production Research* 1–13. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650978>
- Velasco Acosta, A.P.V., Mascle, C., Baptiste, P., 2017. L'applicabilité de l'approche demand-driven MRP dans un environnement complexe. Presented at the CIGI, Compiègne, p. 8.

- Vernadat, F., 2020. Enterprise modelling: Research review and outlook. *Computers in Industry* 122, 103265. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103265>
- Vidal, J., Lauras, M., Lamothe, J., Miclo, R., 2020. Toward an Aggregate Approach for Supporting Adaptive Sales And Operations Planning, in: 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Presented at the 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. 1031–1038. <https://doi.org/10.1109/ICIEA49774.2020.9102060>
- Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C., 1997. *Manufacturing planning and control systems*. McGraw-Hill, New York.
- Wemmerlöv, U., 1984. Assemble-to-order manufacturing: Implications for materials management. *Journal of Operations Management* 4, 347–368. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(84\)90021-4](https://doi.org/10.1016/0272-6963(84)90021-4)
- Wiendahl, H.-H., Von Cieminski, G., Wiendahl, H.-P., 2005. Stumbling blocks of PPC: Towards the holistic configuration of PPC systems. *Production Planning & Control* 16, 634–651. <https://doi.org/10.1080/09537280500249280>
- Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H.A., Nyhuis, P., Zäh, M.F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., Brieke, M., 2007. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals* 56, 783–809. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003>
- Wight, O., Wight, O., Brun, F., 1984. Réussir sa gestion industrielle par la méthode M.R.P.-2: 80 réponses aux questions que se pose la direction. Éditions de " L'Usine nouvelle, Paris.
- Wikner, J., Rudberg, M., 2005. Integrating production and engineering perspectives on the customer order decoupling point. *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt* 25, 623–641. <https://doi.org/10.1108/01443570510605072>
- Wildemann, H., 1988. Just-in-time production in West Germany. *International Journal of Production Research* 26, 521–538. <https://doi.org/10.1080/00207548808947882>
- Womack, J.P., Jones, D.T., Roos, Daniel., 1990. *The machine that changed the world*. Massachusetts Institute of Technology.
- Yanikoğlu, İ., Gorissen, B.L., den Hertog, D., 2019. A survey of adjustable robust optimization. *European Journal of Operational Research* 277, 799–813. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.031>
- Zäpfel, G., Missbauer, H., 1993. New concepts for production planning and control. *European Journal of Operational Research* 67, 297–320. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90287-W](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90287-W)
- Zeigler, B.P., Muzy, A., Kofman, E., 2019. *Theory of modeling and simulation: discrete event and iterative system computational foundations*, 3rd ed. ed. Academic Press, San Diego (Calif.).

Liste des annexes

<u>ANNEXE 1 GUIDE THÉMATIQUE ADAPTÉ DDMRP</u>	<u>3</u>
<u>ANNEXE 2 EXEMPLE DE SYNTHÈSE DES ENTRETIENS</u>	<u>9</u>
<u>ANNEXE 3 LISTES DES PUBLICATIONS DDMRP IDENTIFIÉES PAR LA REVUE DE LITTÉRATURE SYSTÉMATIQUE.....</u>	<u>15</u>
<u>ANNEXE 4 RAPPORT D'ANALYSE DE DDMRP.....</u>	<u>- 19 -</u>

Annexe 1

Guide thématique adapté DDMRP

Guide thématique adapté DDMRP

1. Répondant

- 1.1. Entreprise ayant implanté DDMRP, préciser le poste occupé
- 1.2. Consultant ayant mené un projet DDMRP

TS1- Justification de l'adoption du PPC

- 1.1. Origine de la réflexion

TS2- Caractéristiques de l'entreprise

- 1.2. Taille
- 1.3. Secteur activité
- 1.4. Position dans la chaîne logistique

TS3- Organisation industrielle de l'entreprise

- 1.5. Type de pilotage
 - Make to stock
 - Make to order
 - Assemble to order
 - Ingenier to order
- 1.6. Organisation atelier
 - Ligne continue
 - Ligne discontinue
 - Job shop (atelier spécialisé)
 - unitaire

TS4- Projets de développement futur

- 1.7. En cours OUI - NON
- 1.8. Si oui :
 - 1.8.1. quel périmètre
 - 1.8.2. quels types de pièces restent exclus
 - 1.8.3. quels délais

TT1- Le périmètre du projet

- 2.1. Périmètre pilote
 - 2.1.1. nb total de références
 - 2.1.2. nb de référence gérées en DDMRP
- 2.2. Type de déploiement
 - 2.2.1. Buffers :
 - stock,
 - temps,
 - capacité
 - 2.2.2. Points de contrôle
 - 2.2.3. DDS&Op
 - 2.2.4. DDAS&Op
- 2.3. type de pilotage concernant les pièces gérées en DDMRP :
 - 2.3.1. MTS

2.3.2.MTO

2.3.3.ATO

2.3.4.ETO

2.4. profil de demande des pièces gérées en DDMRP

2.4.1.volume :

high runner

low runner

2.4.2.demande :

stable,

variable mais prévisible,

aléatoire,

saisonnière,

ramp up,

ramp down,

2.4.3.complexité :

nombre de niveau de nomenclature

délai moyen de fabrication

TT2-L'accompagnement et formation

2.5. Formation initiale

2.5.1. Qui :

2.5.1.1. nombre de personnes

2.5.1.2. profils

2.5.2.Comment :

2.5.2.1. interne

2.5.2.2. externe

2.5.3.Durée en jours de la phase de formation

2.6. Accompagnement dans le déploiement

2.6.1.Cabinet consultant

2.6.2.Leader interne

TT3- La durée du projet

2.7. Date de début de la réflexion

2.8. lancement projet GO LIVE

2.9. achèvement pilote

TT4- Les outils

2.10. Logiciel utilisé

2.10.1. Phase pilote

2.10.2. Phase exploitation

2.11. Quelles notions/outils doivent selon vous être maîtrisés avant le lancement de DDMRP :

2.11.1. PDP

2.11.2. PIC

2.11.3. ERP

2.11.4. Amélioration continue

2.11.5. Autres, précisez

2.12. Il est difficile de faire coexister DDMRP et MRP classique : OUI - NON

2.13. La fiabilité de données est essentielle à la réussite de DDMRP : OUI - NON

TT5- REX sur la phase projet

- 2.14. Délai d'obtention des 1ers résultats
- 2.15. Résultats initiaux

TO1- L'utilisation concrète du PPC

- 3.1. Positionnement des buffers
- 3.2. Dimensionnement
- 3.3. L'absence de scheduling est problématique : OUI - NON

TO2- Les outils utilisés

- 3.4. L'implantation de DDMRP nécessite-t-elle, quand même, le recours à d'autres outils tels que
 - 3.4.1.ERP
 - 3.4.2.APS
 - 3.4.3.MES
 - 3.4.4.Excel
 - 3.4.5.Business Intelligence

TO3- Les résultats quantitatifs

- 3.5. KPI principaux
 - 3.5.1.OTD
 - 3.5.2.Stock
 - 3.5.3.LT
 - 3.5.4.BFR : stable, hausse (transitoire ou constante), baisse
 - 3.5.5.Autres

TO4- Les résultats qualitatifs

- 3.6. Amélioration de la gestion de priorités
- 3.7. Simplification du métier de planners
- 3.8. La maturité dans la démarche de performance industrielle est essentielle à la réussite OUI- NON
- 3.9. Autres, précisez

Annexe 2

Exemple de synthèse des entretiens

	ENTREPRISE 1	ENTREPRISE 2	ENTREPRISE 3
1. Répondant			
1.1. Entreprise ayant implanté DDMRP, préciser le poste occupé	oui, chef de projet	PDG	oui, responsable planification + chef de projet + responsable de site
1.2. Consultant ayant mené un projet DDMRP			
1.2. Expert logiciel			
1 Niveau stratégique			
TS1- Justification de l'adoption du PPC			
1.1 Origine de la réflexion	forte croissance avec flux de plus en plus complexes, atteinte des limites des méthodes traditionnelles, développement d'une logique SCM groupe	reprise en juillet 2015, OTD mais aussi constat des points faibles de MRP2	problème d'OTD (90% insuffisant) demande des clients de l'améliorer
TS2 Caractéristiques entreprise			
1.2. Taille	1900	à vérifier	GE
1.3. Secteur activité	aéronautique	assembleur électronique	aéronautique
1.4. Position dans la chaîne logistique	équipementier rang 1	sous traitant	Fournisseur rang 1
TS3 Organisation industrielle de l'entreprise			
1.5. Type de pilotage (éventuellement ventilation)			
- Make to stock	0	15%	
- Make to order	0	30%	
- Make to forecast	100%	10%	100%
- Assemble to order	0	40%	
- Ingenier to order	0	5%	
1.6. Organisation atelier			
- Ligne continue	0		
- Ligne discontinue	0	60	
- Job shop (atelier spécialisé)	100%	10	oui
- unitaire	0	30% (ex montage de coffret)	
TS4 Projet de développements futurs			
1.7. En cours OUI - NON	oui	oui	oui
1.8 Si oui :			
1.8.1. quel périmètre	100% d'une BU de 300 ref vendues	1638 REF	toutes les BU, vont sur DDs&Op sur 1 BU expérimentale
1.8.2 quels types de pièces restent exclus	aucune	30% fabriqués à la commande en one shot	
1.8.3. quels délais	courant 2019	oui encore des essais de convaincre d'autres clients mais des difficultés à convaincre	en cours
2 Niveau TACTIQUE			
TT1 - Le périmètre du projet			
2.1.1. nb total de références	1	25000 ref début 2018	
2.2. nb de référence gérées en DDMRP	250 ref de composants	17 ref d'un client ce qui représente 8%	18% sur le groupe
2.2. type de déploiement			
2.2.1. buffers :			
Š- stock,	oui	oui	oui

-temps,	non	non	non
Š- capacité	non	non	non
2.2.2.points de contrôle	non	non	non
2.2.3.DDS&Op	non	non	en cours
2.2.4.DDAS&Op	non	non	non
2.3 type de pilotage concernant les pièces gérées en DDMRP :			
2.3.1.MTS	oui	pour les PF	
2.3.2.MTO	pas concerné	un peu	oui
2.3.3.ATO	pas concerné	pour des semi-finis pour les buffers de composants	
2.3.4.ETO		non	
2.3.4.MTF	pas possible	a été fait pour 1 client sur la phase dimensionnement	
2.4. profil de demande des pièces gérées en DDMRP			
2.4.1.volume :			
- high runner	parfait	oui mais attention au profil de la demande, pas l'automobile...	oui
-low runner	non	non	oui avec adaptation
2.4.2.demande :			
- stable,	oui		oui
- variable mais prévisible,	oui en jouant sur le coeff de variabilité		oui
- aléatoire (spike)	peu concerné	OUI VRAI PB	MRO non
- saisonnière,	peu concerné		
- ramp up,	oui au top grâce au recalcul auto de l'ADU	essai mais pas efficace	
-ramp down,	oui au top grâce au recalcul auto de l'ADU	oui un essai mais attention à la MOQ en fin de vie	
2.4.3.complexité :			
-nombre de niveaux de nomenclature	7 ou 8	max 5, moyenne à 3	15 niveaux, 4200 ref
- délai moyen de fabrication	3 mois	84 jours	300jours
TT2- L'accompagnement et formation			
2.5. Formation initiale			
2.5.1. Qui :			
2.5.1.1.- nombre de personnes	15 sur 3 sites	20	12
2.5.1.2.- profils	essentiellement des planners et qq chargés d'affaires quelques managers de planneurs mais pas assez -	approvisionneurs, ordo, responsable atelier et les commerciaux et PDG, resp logistique	SCM UK
2.5.2.Comment :			
2.5.2.1.- interne	pas dans la phase pilote	oui pour beaucoup avec CONSULTANT	
2.5.2.2.- externe	cabinet conseil	POUR pdg	Ptak
2.5.3.Durée en jours de la phase de formation	2+1 jours		2
2.6. Accompagnement dans le déploiement			
2.6.1.Cabinet consultant	oui	oui	non sauf pour formation initiale par Ptak

2.6.2.Leader interne	pas assez (ils envisagent de faire certifier en interne pour pouvoir former eux-mêmes sur la phase d'extension)	OUI	des leaders sur chaque site
TT3- La durée du projet			
2.7 Date de début de la réflexion	2015	2016	2017
2.8 lancement projet GO LIVE	juin-15	mars-16	janv-18
2.9.achèvement pilote	4 mois (10/2015)	sept-16	
TT4- Les outils			
2.10 Logiciel utilisé			
2.10.1.Phase pilote	R+ dès le départ, Excel uniquement pour simulation en avant projet	Excel	surtout pas Excel
2.10.2.Phase exploitation	R+	BtoWise	SAP+Logiciel propriétaire
2.11 Quelles notions/outils doivent selon vous être maîtrisés avant le lancement de DDMRP :			
2.11.1. PDP	oui	oui	
2.11.2.PIC	oui pour l'extension de la méthode	oui	
2.11.3.ERP	oui	oui, reste la cœur du calcul,	
2.11.4.Amélioration continue	oui, sur les aspects amélioration DDMRP mais aussi phase opérationnelle gestion d'atelier	indispensables, menées en parallèle	oui
2.11.5.Autres, précisez	faire basculer le Top management	charge/capacité, les concepts achats, TOC, matrice de poly compétences	
2.12. Il est difficile de faire coexister DDMRP et MRP classique : OUI - NON	oui	oui, vraie difficulté	
2.13. La fiabilité de données est essentielle à la réussite de DDMRP : OUI - NON	oui	oui mais le système n'est pas très fragile, aucun problème de paramétrage n'a pas eu d'incidence, la surveillance des buffers	Oui essentielle plus que la MAJ
TT5- REX sur la phase projet			
2.14. Délai d'obtention des 1ers résultats	4 mois (=2 cycles complets)	dès le mois d'avril, pas de ratage, KPI OTD immédiatement, LT 6 mois, stock 1 an	1 cumulative lead time
2.15 Résultats	99%	98-99%	oui
3 Niveau opérationnel			
TO1- L'utilisation concrète du PPC			
3.1. positionnement des buffers	- aux interfaces entre les sites -endroits stratégiques pour que délai de la dernière boucle soit < au délai client	cf travail de consultant et les appros, l'ordo et l'atelier, simulation par Excel	cf methodo
3.2. dimensionnement	cf formule données dans la méthode, qu'on affine ensuite grâce à l'amélioration continue	suivi des formules du bouquin, pas toujours zone verte = MOQ mais aussi cycle time	cf methodo
3.3. L'absence de scheduling est problématique : OUI - NON	non	OUI, pb de calcul de la charge	oui dev d'un outil
TO2- Les outils utilisés			
3.4 L'implantation de DDMRP nécessite, quand même, le recours à d'autres outils tels que			
3.4.1.ERP	oui	oui excalibur, mais des lacunes	
3.4.2.APS	non	non	oui
3.4.3.MES	non	non	

3.4.4.Excel	pas pour DDMRP	permet la manipulation des données	
3.4.5.Business Intelligence	en cours pour amélioration du paramétrage	non	oui
T03- Les résultats quantitatifs			
3.5. KPI principaux			
3.5.1.OTD	surtout sur l'aspect qualitatif	augmentation à cause de clients peu vertueux a départ mais maintenant en baisse	oui mais surtout qualité des stocks
3.5.2.Stock			
3.5.3.LT	stable	en augmentation au départ	
3.5.4 BFR : stable, hausse (transitoire ou constante), baisse	pas vécu	17 jours	nr
T04- Les résultats qualitatifs			
3.6.Amélioration de la gestion de priorités	oui	amélioration sans conteste, notamment avec ADV	oui
3.7.Simplification du métier de planners	oui et redirection vers davantage de VA	oui	oui
3.8. La maturité dans la démarche de performance industrielle est essentielle à la réussite OUI- NON	oui	non pas forcément au départ s'ils avaient mieux connu MRP, il y aurait eu plus de résistance mais ensuite il faut éduquer	oui la démarche lean étant bien intégrée cela a aide
3.9.Autres, précisez	flexibilité pour faire face aux ordres par adaptation de la capacité	ergonomie de visualisation permet d'éviter de se prendre le mur	gestion du changement attention à la capacité des fournisseurs

Annexe 3

Listes des publications DDMP identifiées par la revue de littérature systématique

auteur	type	thématique	année	Étude simulateur in vitro	Étude simulateur in vivo	Étude de cas d'implantation	modélisation	quantitatif autre	enquêtes et interviews	survey	analyse conceptuelle	revue de littérature
Achergui, Allaoui, Hsu	conférence	placement buffers	2020				x					
Achergui, Allaoui, Hsu	conférence	placement buffers	2021					x				
Al-Ammar	thèse professionnelle	comparatif autre PPC	2019			x						
Andrade Talavera	master	comparatif autre PPC	2021	x								
Arakatla Ad	master	présentation générale	2020								x	
Azzamouri Baptiste , Dessevre, Pellerin	revue	revue de littérature	2021									x
Azzamouri, Baptiste, Pellerin, Desserve	revue	opérationnel	2022	x								
Bahu , Bironneau, Hovelaque , Vigouroux	conférence	implantation	2018							x		
Bahu, Bironneau, Hovelaque	revue	implantation	2019							x		
Baptiste, Pellerin	conférence	opérationnel	2018	x								
Bayard, Grimaud	conférence	paramétrage	2018	x								
Bayard, Grimaud, Delorme	conférence	comparatif autre PPC	2020	x	x							
Bayard, Grimaud, Delorme	conférence	comparatif autre PPC	2020	x	x							
Bayard, Grimaud, Delorme	conférence	placement buffers	2021	x								
Butturi, De Rosa, Balugani, Gamberi	conférence	revue de littérature	2021									x
Cajamarca Torrestagle	master	comparatif autre PPC	2019		x							
Centeno Huayhuas, Osorio Barra	master	comparatif autre PPC	2020		x							
Cuadra	master	présentation générale	2017					x				
Damand, Lahrichi, Barth	revue	paramétrage	2022					x				
Dessevre, Baptiste, Lamothe	conférence	opérationnel	2020	x								
Dessevre, Baptiste, Lamothe, Pellerin	revue	paramétrage	2021	x	x							
Dessevre, Lamothe, Pomponne, Baptiste, Pellerin	conférence	implantation	2020			x						
Dessevre, Martin, Baptiste, Lamothe, Lauras	conférence	paramétrage	2019	x								
Dessevre, Martin, Baptiste, Lamothe, Pellerin, Lauras	conférence	paramétrage	2019	x								
Ducrot, Ahmed	master	comparatif autre PPC	2019		x				x			
El Marzougui, Messaoudi, Dachry, Sarir, Bensassi,	conférence	revue de littérature	2020									x
Erraoui , harkaouin, Echchatbi	revue	applicabilité	2019								x	
Favaretto, Marin	working paper	applicabilité	2018								x	
Favaretto, Marin, Tolotti	working paper	paramétrage	2021				x					
Fernández Cevallos,; Bastidas Cabrera	master	comparatif autre PPC	2018		x							
Franco Quispe ; Yauri Tito	master	comparatif autre PPC	2021		x							
Fuentes , González Vargasa , Tabares	master	comparatif autre PPC	2018		x							
Gabriel, Luis, et Borda Angel	master	comparatif autre PPC	2016		x							
Granda, Tatiana Cristina Salazar	master	applicabilité	2017				x					
Hietikko, Jari	master	comparatif autre PPC	2014		x							
Ihme, Mathias	thèse	comparatif autre PPC	2015		x							
Ihme, Stratton	conférence	comparatif autre PPC	2015		x							

auteur	type	thématique	année	Étude simulateur in vitro	Étude simulateur in vivo	Étude de cas d'implantation	modélisation	quantitatif autre	enquêtes et interviews	survey	analyse conceptuelle	revue de littérature
Jiang ,Rim	revue	placement buffers	2016	x			x					
Jiang ,Rim	revue	placement buffers	2017	x			x					
Johansson, Södermark	master	opérationnel	2019								x	
Kortabarria	thèse	comparatif autre PPC	2018			x						
Kortabarria, Apaolaza,Lizarralde	revue	comparatif autre PPC	2019			x						
Kortabarria, Unai , Aitor, Itxaso	revue	comparatif autre PPC	2018			x						
Laraje, Lissane Elhaq	conférence	opérationnel	2018				x					
Lee,Rim	revue	paramétrage	2019				x					
Linares Leguizamo , Mayorgo Totaitive	master	comparatif autre PPC	2017		x							
Martin	thèse	paramétrage	2020	x	x							
Martin, Lauras; Baptiste, Lamothe, Fouque, Miclo	conférence	paramétrage	2019				x					
McCullen, Eagle	conférence	implantation	2015					x	x			
Meinzel	master	comparatif autre PPC	2019		x							
Miclo	thèse	comparatif autre PPC	2016	x	x							
Miclo, Fontanili, Lauras, Lamothe, Milian	conférence	comparatif autre PPC	2015	x								
Miclo, Fontanili, Lauras, Lamothe, Milian	revue	comparatif autre PPC	2016	x								
Miclo, Lauras, Fontanili, Lamothe, Melnyk	revue	comparatif autre PPC	2018	x						x		
Mukhlis, IndraEfraldi, Rimawan	revue	comparatif autre PPC	2019			x						
Navarrete Castro	master	comparatif autre PPC	2019		x							
Ochoa Andrade	master	implantation	2015			x						
Orue, Lizarralde, Kortabarria	revue	implantation	2020									x
Pekarcikova, Trebuna, Kliment, Trojan	revue	applicabilité	2019	x								
Pekarcikova, Trebuna , Kliment , Edl , Rosocha	revue	comparatif autre PPC	2020								x	
Perez Castro	master	comparatif autre PPC	2018		x							
Salazar	master	comparatif autre PPC	2019	x								
Shofa, Moeis, Restinana	conférence	comparatif autre PPC	2018		x							
Shofa, Widyarto	conférence	comparatif autre PPC	2017		x							
Sinha , Ubale	conférence	comparatif autre PPC	2020		x							
Solorzano Garcia	master	comparatif autre PPC	2019		x							
Thürer, Fernandes, Stevenson	revue	comparatif autre PPC	2020	x								
Torres Velasquez	master	implantation	2019			x						
Tousni	master	comparatif autre PPC	2018	x								
Velasco Acosta ,Mascle, Baptiste	conférence	comparatif autre PPC	2017	x								
Velasco Acosta ,Mascle, Baptiste	revue	applicabilité	2019	x								
Vidal, Lauras , Lamothe, Miclo	conférence	paramétrage	2020	x			x					
Vilela Vera	master	comparatif autre PPC	2018		x							
Villa Hincapie	master	implantation	2018			x						
Zachariah-George	master	comparatif autre PPC	2018		x							

Annexe 4

Rapport D'analyse de DDMRP

D0-STRUCTURATION DE L'ÉTUDE	- 2 -
D1 PÉRIMÈTRE FONCTIONNEL	- 4 -
D2 GRILLE D'ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES	- 8 -
D3 SYNTHÈSE DES « ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS »	- 19 -
D4 ANALYSE DES INDICATEURS	- 35 -
D5 ANALYSE BÉNÉFICES/RISQUES	- 41 -
D6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	- 47 -

Le présent rapport d'analyse est issu de l'utilisation du Cadre Méthodologique proposé pour l'évaluation des PPC dans le cadre de l'évaluation de DDMRP. Il a vocation à évaluer DDMRP, à apporter des connaissances approfondies sur son fonctionnement et à le positionner parmi les principaux PPC.

Ce cadre s'appuie sur 3 phases complémentaires :

- P0-Characterisation : étape obligatoire permettant de comprendre et positionner globalement le PPC étudié parmi les autres PPC
- P1-Etude Qualitative : son objectif principal est de confronter le PPC à la réalité industrielle en capitalisant les retours d'expériences issus de différentes sources
- P2-Etude Quantitative : son objectif essentiel est d'identifier les paramètres ayant une influence sur la performance quantitative du PPC

La proposition méthodologique oblige commencer par P0-Characterisation afin d'acquérir la compréhension minimale nécessaire aux autres Phases. Les deux autres Phases de l'étude peuvent être démarrées dans un ordre indifférent en fonction des besoins de l'étude et de la connaissance du chercheur. Des itérations entre les 2 phases sont ensuite menées tout au long de l'étude permettant un enrichissement des résultats.

Ces itérations alimentent 5+2 livrables, les 5 premiers sont dédiés chacun à une thématique PPC et permettent une capitalisation et une traçabilité des résultats. Un livrable préalable « D0-Structuration de l'Étude » permet d'identifier les itérations et de nommer chacune d'entre elles afin de tracer la source des résultats présentés. D6 est la synthèse faisant état de la connaissance acquise au fil des itérations.

Nous présentons ici le Rapport d'Analyse réalisé dans le cadre de l'évaluation de DDMRP.

D0-Structuration de l'étude

Dans le cadre de l'évaluation de DDMRP, 18 itérations i.e. utilisation de Phases spécifiques, ont été réalisées. Elles sont présentées dans le tableau suivant afin de retracer l'historique de l'étude.

La codification fait apparaître un code de type Px-i avec

- la Phase Px avec x = 0 à 2 (respectivement Caractérisation, Étude Qualitative et Étude Quantitative)
- i = numéro d'itérations

Si la Phase conduit à de nouveaux questionnements traitables une autre Phase, une ligne Interface est créée avec un code de type :

- Interface Px-Py/Dz avec :
 - o Px la Phase de laquelle est issu la question,
 - o Py la Phase suivante qui devra la traiter
 - o et Dz le livrable concerné (de 1 à 5)

Chaque itération donné lieu à l'archivage des documents ayant permis sa réalisation.

Phase	Libellé	Objectifs visés
P0-1	Appropriation des concepts	Acquisition des concepts de base
	<i>Interface P0-P1/D1</i>	le périmètre décisionnel identifié dans la littérature correspond-il à la réalité terrain ?
	<i>Interface P0-P1/D2</i>	quelles sont les caractéristiques des contextes industriels pour lesquels DDMRP semble pertinent ou au contraire quels sont ceux qui sont incompatibles du point de vue des experts et des utilisateurs ?
	<i>Interface P0-P2/D2</i>	parmi les caractéristiques standard du contexte industriel et des produits (, quelles sont celles qui influencent la performance ?
	<i>Interface P0-P2/D3</i>	Le placement des buffers est la 1ère étape du paramétrage, comment est-il réalisé par les entreprises ? a-t-il une influence sur la performance?
	<i>Interface P0-P1/D4</i>	les performances annoncés sont-elles confirmées par des retours d'expériences industrielles?
	<i>Interface P0-P1/D5</i>	Aucun information n'est disponible concernant la performance qualitative
P0-2	État de l'art initial	Identification des problématiques
	<i>Interface P0-P2/D2</i>	les contextes industriels ne sont pas étudiés
	<i>Interface P0-P2/D3</i>	Impact du placement des buffers assez peu investigué
	<i>Interface P0-P1/D5</i>	quasiment aucun élément sur l'évaluation qualitative
P2-1	POC impact financier DDMRP	Confirmer l'intérêt de DDMRP Vérifier l'impact de la diminution des facteurs de variabilité et de délais sur la performance client et financière
	<i>Interface P2-P1/D4</i>	L'amélioration de l'OTD se fait-elle toujours au prix d'une augmentation du niveau de stocks?
P1-1	Entretiens ouverts	Approfondissement de la connaissance de DDMRP, Identification de points clé au sein du Guide Thématique
	<i>Interface P1-P1/D1</i>	Le périmètre a considéré concerne non seulement le nombre de processus PPC inclus mais également le niveau de la chaîne logistique auquel DDMRP est appliqué et son niveau de déploiement (que ce soit en termes des niveau de supply chain impliqués dans la démarche ou du nombre de références
	<i>Interface P1-P2/D3</i>	Le placement des buffers se fait avec les heuristiques et il vaut mieux multiplier les buffers. Est-ce que ce que tous les choix conduisent au même niveau de performance ?
P1-2	Survey étude de cas documentaires	Analyse partielle sur sources docs- conclusion pas de statistiques à ce stade mais besoin de plus d'études

		Études des contextes industriels
	Interface P1-P2/D4	La performance conjointe sur les 3 axes de la performance est assez peu commune. Est-ce que ce phénomène est observable par simulation ce qui signifierait qu'il y a un choix à faire ou bien est-ce une question de maturité ?
P2-2	Études de cas Industriels	Vérifier la performance de DDMRP dans un environnement plus complexe
	Interface P2-P1/D3	Le placement des buffers semble avoir une importance qu'il est difficile d'évaluer
	Interface P2-P1/D3	la taille des ordres générés par les paramètres de DDMRP semble être problématique
	Interface P2-P1/D4	les performances simulées sont médiocres comparativement à la situation actuelle des entreprises, Le paramétrage peut-il être en cause?
P1-3	Entretiens semi-directifs	Approfondissement de la Compréhension
		Analyse de la performance notamment qualitative
	Interface P1-P2/D2	
	Interface P1-P2/D2	le profil des produits est plus important que le contexte industriel dans le cas du choix de DDMRP mais pas de consensus sur les critères notamment en ce qui concerne le profil de la demande et la complexité
	Interface P2-P1/D3	
P2-3	POC taille de lot	Étude des tailles de lot et de leur impact
P2-4	POC lot de transfert (cf. PE1)	Impact des lots de transfert sur la performance
P2-5	Impact des buffers	Étude de l'impact du placement et du nombre des buffers
P1-4	Visites sur Site	Étude de la performance qualitative à partir des REX utilisateurs de différents niveaux
		Identification des paramètres pouvant influencer la performance
	Interfaces P1-P2/D2	Quels sont les paramètres qui influencent la performance et auxquelles les entreprises doivent particulièrement être attentives ?
P1-5	Survey sur 88 études de cas	Établir des statistiques sur l'ensemble des cas industriels toutes sources confondues permettant de conclure sur les contextes industriels et sur les performances quantitatives
P2-6	Complexité de la BOM	Étudier l'impact des facteurs de complexité de la BOM sur la performance globale
P2-7	Profil de la demande	Étudier l'impact des différents paramètres de profil de la demande sur la performance globale de DDMRP
P2-8	POC Visibilité	Un DLT inférieur à la une visibilité de la demande est-il problématique ?
P2-9	POC seuil de pic	Étude de l'impact des seuils de pic
P2-10	POC lien facteur de variabilité-zone rouge-seuil de pic	Vérification de l'impact de l'abaissement du facteur de variabilité sur la zone rouge et donc sur le seuil de détection des pics (nb : détecte plus de pic = lot plus grand=saturation capacité anticipation=augmentation stock)

D1 Périmètre fonctionnel

1 Synthèse

Niveau de décision	Processus	MRP2	Kanban	Conwip	DBR	POLCA	DDMRP	Sources
Stratégique	(1) Détermination d'un plan de production global = charge globale							
	(2) Détermination des ressources globales = capacité globale							
Tactique	(3) Détermination des besoins détaillés par référence							
	(4) Détermination détaillée de la capacité				goulet			
Opérationnel	(5) Lancement des ordres de fabrication et d'approvisionnement							P0-1-A P1-2-C
	(6) Ordonnancement,				goulet			P0-A P1-2-C
	(7) Séquencement				goulet			
	(8) Suivi des ordres							P0-A P1-2-C
	(9) Suivi des ressources productives				goulet			

2 Itérations

Phase P0-1 Appropriation des concepts

Description-Analyse

La Caractérisation fait apparaître DDMRP comme un PPC essentiellement centré sur les décisions opérationnelles. Il combine 3 processus pour lesquels il propose des approches originales dont la description est proposée dans le livrable D3.

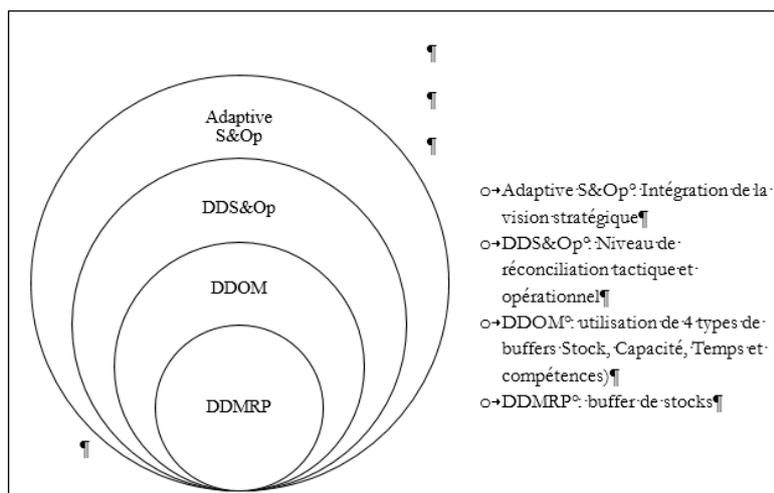
(5) le lancement des ordres

(6) l'ordonnancement

(7) suivi des ordres

À lui seul, il ne comporte pas de processus stratégique ni tactique, mais s'appuie sur d'autres « couches » décisionnelles complémentaires au sein du modèle Demand Driven Adaptive Enterprise qui a été développé par les mêmes auteurs dans la continuité de DDMRP.

L'organisation de cette approche est représentée dans le schéma suivant



Réflexions

Le périmètre de DDMRP est relativement proche de celui des PPC comme Kanban, Conwip et POLca et se veut très opérationnel. Cependant, par rapport, à MRP2, il ne présente ni couche tactique ni couche stratégique.

L'emploi systématique du terme « Stratégique » concernant le choix de placement des buffers paraît peu adapté : le choix d'un placement de stock en tant que tel ne relève pas du niveau de décision Stratégique dès lors qu'il est réversible à moyen, voire court terme, et que les conséquences sont limitées.

En revanche, le choix du mode de réponse à la demande (MTS vs MTO) est stratégique et oriente le positionnement des buffers mais ne relève pas du périmètre des PPC tel que nous l'avons identifié. Il implique en effet d'autres systèmes de l'entreprise (stratégie globale, système commercial et de distribution) et constitue un choix préalable au choix du PPC et donc à son paramétrage.

Interfaces :

PO-P1/D1

L'objectif est de déterminer, dans la Phase P1-Etude Qualitative, si le périmètre de DDMRP utilisé dans les entreprises est conforme à celui décrit dans la Phase PO-Characterisation.

Phase P1-1 Entretiens ouverts

Cette 1^{ère} itération de l'Étude Qualitative est uniquement basée sur les entretiens ouverts réalisés avec 5 experts.

Description-Analyse

Le périmètre DDMRP est confirmé par les experts consultés. DDMRP est un **PPC opérationnel** qui se focalise sur l'utilisation de stocks physiques de découplage appelé buffers. Il comporte un moteur de calcul pour la génération des ordres de fabrication et d'approvisionnement dans un horizon de court terme. Il intègre également des processus d'ordonnancement basé sur la position du stock réel dans le buffer et de suivi des ordres

D'après les experts, les entreprises suivent le processus d'implantation préconisé par DDAE et commencent leur projet par un pilote DDMRP. Cependant, d'après eux au moment des interviews, peu avaient passé les étapes supérieures.

De plus, 3 d'entre eux font état d'un déploiement qui se limite au pilote, et nous signalent également l'importance de vérifier :

- À quel niveau de la chaîne logistique de l'entreprise concerné par DDMRP (approvisionnement, production, distribution)
- Quel est le périmètre réel d'implantation : combien de références sont incluses dans la démarche ?

Réflexions

Les entreprises étudiées qui déploient DDMRP ont toutes commencé par l'utilisation de buffers de stock physiques mais la plupart pointent la nécessité de déployer les autres couches décisionnelles de DDAE pour combler certains manques (gestion charge/capacité, manque de visibilité à moyen et long terme). Cependant, au moment de l'étude, très peu avaient étendu la démarche.

Le périmètre peut aussi être considéré comme étant l'étendue du déploiement : quelles sont les fonctions logistiques incluses dans le périmètre et quel pourcentage de l'activité cela représente-t-il ?

Phase P1-3 Entretiens semi-directifs

Description-Analyse

Parmi les experts consultés, deux étaient des experts internes à des entreprises et ont ainsi pu nous préciser le périmètre DDMRP au sein de leur entreprise.

Ils confirment que le périmètre est limité aux décisions opérationnelles et soulignent le besoin d'outils complémentaires pour gérer les couches tactiques et opérationnelles. Ils signalent travailler sur des projets internes permettant de les intégrer.

Du point de vue de l'étendue du projet, les deux entreprises sont à des niveaux avancés et ont inclus une part importante de leurs références dans la démarche DDMRP

Phase P1-4 Visite sur Sites

Description-Analyse

Sur les 4 entreprises visitées, toutes n'avaient pas le même niveau de déploiement de DDMRP. 3 étaient plutôt matures et 1 n'en était qu'au pilote. Elles avaient uniquement recours aux buffers de stock mais les 3 plus matures menaient des études pour avancer vers DDS&Op. Pour elles, DDMRP comportent une réelle limite dans la gestion de la capacité et ont fait part de leur besoin de gérer la capacité à plus long terme et donc d'étendre la démarche à DDAE. Par contre, aucune des 3 n'envisageaient, au moment de la visite, de passer par le stade DDOM c'est-à-dire de recourir à des buffers de temps et de capacité.

Une 2^{ème} vision du périmètre de déploiement est la considération de l'étendue du projet en termes de nombres de références impliquées ou de % de Chiffre d'affaires géré avec DDMRP.

Parmi les 4 entreprises rencontrées, le périmètre est le suivant :

- Entreprise 1 (ETI) : 250 références sur plusieurs milliers,
- Entreprise 2 (PME) : 25% du CA pour l'entreprise représentant une vingtaine de références sur 25000 références au catalogue, seulement des produits finis qui concernent 3 clients majeurs
- Entreprise 3 (Grand Groupe) : 18% des références de tout le groupe sont gérées en DDMRP
- Entreprise 4 (grand groupe) : pilote sur 1 flux (=1 atelier) avec 2 buffers l'un au milieu de la gamme et l'autre sur les approvisionnements internes

Le périmètre de déploiement de DDMRP n'est pas total mais la volonté d'extension est présente chez les 4 entreprises. La première nous fait part de sa difficulté à étendre le périmètre à d'autres clients à cause du problème de financement du buffer.

Réflexions

Le fait que DDAE soit un PPC en développement conduit à un faible développement de la méthode au-delà de DDMRP. Cependant, les entreprises utilisatrices font part de leur besoin d'outils complémentaires aux niveaux tactique et stratégique. Elles sont dans l'attente de ces nouveaux développements.

D2 Grille d'analyse des caractéristiques

1 Synthèse

	Catégories	Caractéristiques	Valeurs	source
D2-Caractéristiques du PPC	Caractéristiques générales /philosophie	(1) Objectif	Amélioration de la qualité du stock et du taux de service , maîtrise des flux	P0-D, P1-A
		(2) Intégration de la Variabilité	Intégrée dans le PPC par l'intégration de points de découplage censés briser l'effet coup de fouet	P0-A
	Génération des ordres	(3) Rôle des prévisions	Aucun	P0-A, P1-C
		(4) Capacité	Finie	P0-D, P1-A, P2-C
		(5) Niveau de prise de décisions	Centralisé	P0-A
		(6) Contrôle du flux dans le planning	Time Phased	P0-A
		(7) Modèle de gestion de stock	Continu/quantité variable	P0-A
	Atelier	(8) Contrôle d'atelier	Pull	P0-A
		(9) Système à cartes	Non	
		(10) Système de contrôle	Priorité en fonction de la position de la NFE dans le buffer de stock	P0-A
D2-Contexte industriel	Profil des entreprises	(11) Taille de l'entreprise	Sans influence	P0-A, P1-2-C, P1-5-C
		(12) Secteur d'activité	Sans influence	P0-A, P1-2-C, P1-5-C
	Process	(13) Mode de réponse à la demande	Dépend du placement des buffers, compatible MTS, MTO et ATO Pas pour les systèmes ETO	P0-A, P1-2-C, P1-5-C
		(14) Mode de production	Discret ou continu	P0-A, P1-2-C, P1-5-C
		(15) Organisation d'atelier	Sans importance lié au placement de buffer	P0-A
		(16) Existence de goulet	Oui, mais intégré dans DDOM	P0-A,
	Complexité produits	(17) Hauteur	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-A (PE2)
		(18) Largeur	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-A (PE2)
		(19) Densité	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-A (PE2)
		(20) Nombre de produits	1 seul ► Multiproduit	Non testé
	Demande	(21) Profil de la demande	Stable, Saisonnière, Ramp-up Très adapté à la demande stable et au ramp-up Performance moins bonne sur le profil saisonnier (stock plus élevé et OTD en baisse)	P1-2-C, P2-6-C
		(22) Variabilité de la demande	Faible ► Forte	
		(23) Horizon de Visibilité	Impact négatif très important si $horizon < DLT$	
		(24) Volume de la demande	Peu d'impact	P2-A (PE3)
Limitations	(25) Environnement Rate Based auxquels DDMRP n'apporte pas de plus-value		P2-A (étude de cas in vivo)	

2 Itérations

Phase P0-1-Appropriation des concepts

Description et Analyse

La Phase de Caractérisation a permis de dégager l'ensemble des Caractéristiques de DDMRP :

(1) Objectif : L'objectif affiché de DDMRP : **promouvoir le flux** plutôt que les coûts. Les auteurs insistent sur les erreurs qui découlent selon eux de la focalisation sur les coûts. Ils s'appuient fortement de la Théorie des Contraintes (TOC) pour assoir les concepts théoriques sous-jacents. À titre d'exemple, ils dénoncent la mise en place de lots de production en vue de diminuer le coût de production.

(2) Intégration de la variabilité DDMRP est un PPC qui ambitionne de limiter les conséquences de la variabilité en proposant :

- de supprimer l'utilisation des prévisions dans la génération des ordres,
- d'utiliser des stocks de découplage comme réponse pragmatique,
- d'intégrer systématiquement la variabilité dans le dimensionnement du système.

(3) Rôle des prévisions : elles sont exclues de la méthode DDMRP

(4) Capacité : DDMRP est présenté comme un système permettant la maîtrise de la capacité grâce au stock maximum qu'il impose. Ce maximum doit garantir la faisabilité.

(5) Niveau de prise de décision : centralisé au niveau du service planification qui gère l'ensemble des informations à partir des informations remontées des autres services (logistique, production)

(6) Contrôle du flux : DDMRP est un système Time Phased qui utilise les délais de chaque référence pour les positionner dans le temps (voir D3)

(7) Modèle de gestion de stock : on peut assimiler DDMRP à un **système combinant un seuil et un niveau de rechargement, donc une date et une quantité variables.**

	Date Fixe	Inventaire permanent ou à seuil
Quantité Fixe	Gestion calendaire	Point de commande (Kanban)
Quantité variable	Rechargement périodique	DDMRP

(8) Contrôle d'atelier : une méthode de gestion de Flux Pull puisque pilotée par la demande réelle comme pour Kanban. La demande réelle est servie sur stock et les ordres sont lancés pour reconstituer les stocks

(9) Système à cartes : non, même si le système est très visuel, il est informatisé

Concernant la description du contexte industriel pour lequel DDMRP serait pertinent, la Caractérisation n'est que peu contributive.

DDMRP est présenté comme **adapté à tout type de mode de réponse à la demande (13) et process (14 et 15) à condition de positionner et dimensionner correctement les buffers** qui apparaissent comme l'une des clés de ce PPC.

Par contre, les caractéristiques de l'entreprise, de la demande et la complexité des produits ne sont pas abordés par les théoriciens de DDMRP.

Réflexions

Les besoins sont servis sur stock et non fabriqués à la demande stricto sensu. Le terme Demand Driven pourrait donc paraître galvaudé cependant, tous les ordres sont déclenchés suite à une consommation liée à la demande réelle et non pas à des prévisions.

Interfaces

P0-P1/D2

DDMRP semble adapté à tous les contextes industriels. Cela est-il confirmé par la réalité industrielle ? Quelles sont les caractéristiques des contextes industriels pour lesquels DDMRP semble pertinent ou au contraire quels sont ceux qui sont incompatibles du point de vue des experts et des utilisateurs ?

P0-P2/D2

Parmi les caractéristiques standard du contexte industriel et des produits (, quelles sont celles qui influencent la performance ?

Phase P0-2- État de l'art initial

Description-Analyse

L'analyse des publications académiques démontre que seules 4 publications ont traité la question des environnements d'applicabilité de DDMRP. 3 sont des travaux préliminaires sur des cas spécifiques d'entreprises (Erraoui et al., 2019; Granda, 2017). Une étude de cas in-vitro (Pekarcikova et al., 2019) s'interroge en conclusion sur l'applicabilité à des produits à délais longs et la dernière (Velasco Acosta et al., 2019) traite de complexité de l'organisation industrielle.

La conclusion, de cette Phase P0-2, est l'absence d'information concernant les caractéristiques du contexte industriel au sein des publications académiques ce qui confirme les conclusions de la revue de littérature de (Butturi et al., 2021)

Réflexions

L'absence de travaux sur les caractéristiques du contexte productif peut être due à la relative jeunesse de DDMRP. Le manque de cas réels n'a pas encore permis d'établir des statistiques pouvant alimenter la réflexion.

Interfaces

P1-P2/D2

Les contextes industriels ne sont pas vraiment étudiés. Plusieurs publications concluent sur la nécessité d'investiguer DDMRP sur des environnements plus complexes.

Phase P2-1- Impact financier de DDMRP

Description-Analyse

Cette première étude simulatoire qui avait pour but de démontrer l'intérêt de DDMRP par rapport à MRP2 a montré que le niveau de stock de DDMRP standard était 8% plus élevé qu'un celui obtenu avec un MRP2 géré avec un stock de sécurité empirique (délai x consommation moyenne).

Avec un MRP2 géré avec un stock de sécurité probabiliste basé sur un taux de service de 90% l'écart se creuse car le stock est 5 fois plus élevé mais avec un OTD supérieur de 5 points.

Réflexions

Le constat de ce niveau de stock supérieur avec DDMRP pose la question du respect des objectifs fixés par ce PPC. Cette expérience est-elle représentative d'un phénomène concernant le niveau de stock ? Ou bien est-ce lié à aux paramètres utilisés dans cette expérience?

Phase P1-2- Étude des cas documentaires

Description et Analyse

Une première analyse documentaire a permis de recenser une soixantaine de cas réels d'implantation de DDMRP identifiés dans la littérature.

(11) Taille de l'entreprise :. On dénombre 52% d'ETI, 21% de PME et 27% de grands groupes parmi les adoptants de DDMRP. La taille ne semble pas influente

(12) Secteur d'activité : là encore la répartition ne fait ressortir aucun secteur industriel plus qu'un autre

(13) Mode de réponse à la demande : le mode MTS est dominant avec 45% des cas, contre 23% de MTO et 25% de couplage MTS-MTO incluant probablement un point de découplage.

(14) Mode de production : l'analyse des cas fait état d'une répartition assez proche entre les mode discret et continu.

Il semble donc que les caractéristiques du contexte industriel soient assez peu contributives dans l'explication de l'adoption de DDMRP

Réflexions

Phase P2-2 Étude de cas industriels

Nous avons mené 2 études de cas simulatoires sur données in-vivo. L'objectif était de déterminer si DDMRP était un PPC intéressant, notamment du point de vue des stocks et du WIP, dans le cas de ces entreprises comparativement à leur MRP2 actuel.

Les deux entreprises agissent dans **un contexte de (20) demande récurrente de faible volume** (quelques unités par semaine) ce qui les poussent vers un contrôle de Flux de type (6) de « Rate based ». Elles font face à de (21) **nombreuses variations de la demande** et cherchent des solutions pour améliorer leur gestion des flux. Elles atteignent, malgré tout, un OTD quasiment parfait mais au prix d'une forte réactivité au niveau de la planification et de la gestion d'atelier.

Les données sont confidentielles, cependant les paramètres utilisés dans les différents dans les plans d'expérience ainsi que les résultats base 100 situation réelle de l'entreprises sont présentés dans les documents de travail.

Pour rappel, la simulation à évènements discrets évalue la « performance autonome » des PPC c'est-à-dire en dehors des conséquences des prises de décision humaines. 02 types de comparaisons ont été effectuées : (1) vis-à-vis de leur situation réelle (2) vis-à-vis d'un MRP2 « autonome ». L'objectif est d'éviter de comparer DDMRP non soumis aux décisions humaines à une situation réelle qui résulte d'un ensemble de décisions non modélisables. Plusieurs scenarios de demande ont été testés pour établir les comparatifs à différents niveaux de variabilité.

Description et Analyse

Pour les 2 entreprises, les résultats n'ont pas été probants car inférieur en termes d'OTD et de niveau de stock tant du point de vue de la situation réelle que MRP2 simulée. Le détail des résultats quantitatifs est présenté dans le livrable D4 Analyse des indicateurs.

L'absence de résultats favorables **pose la question de la pertinence de DDMRP** pour les systèmes de contrôle de flux (6) **rate based en cas de profil de demande (21) récurrente et de (24) faible volume.**

Réflexions

Les résultats issus de ces expérimentations in-vivo ne corroborent pas les résultats identifiés lors de la Phase de PO-Characterisation. Des effets de seuils liés au volume pourraient être en cause

Notons que la quantité lancée dans le système DDMRP n'est pas nécessairement en lien avec la consommation puisqu'une fois en dessous du seuil, il s'agit d'atteindre le niveau de recombplètement.

Phase P1-3 Entretiens semi-directifs

Description-Analyse

Les entretiens menés avec les experts ont mis en évidence des contradictions sur les objectifs poursuivis par DDMRP

- (1) **Objectifs** : PO-avait défini DDMRP comme un PPC permettant de diminuer le montant des stocks et d'améliorer la gestion des flux pour mieux répondre à la demande client. Cependant, les études académiques ne valident pas toutes cette baisse de stock et les experts interrogés à ce sujet reconnaissent **que l'objectif n'est pas tant le niveau de stock qui s'améliore mais la qualité** i.e. que les stocks possédés le sont à bon escient et sont sous contrôle. Les entreprises utilisatrices valident unanimement ce résultat et confirment leur meilleure maîtrise des flux permettant d'améliorer le service client.

Concernant les caractéristiques du contexte industriel, les experts ont confirmé le fait qu'il n'y avait pas de contexte particulièrement favorable ou défavorable à DDMRP. Pour eux c'est le placement des buffers qui permet de s'adapter. Toujours selon leur retour, le profil des pièces à bufferiser est essentiel. Cependant, il n'y a pas de consensus sur les critères à retenir. La question de la **variabilité de la demande (22)** a particulièrement fait débat certains pensant DDMRP très adapté aux contextes fortement variables quand d'autres le préconisent davantage pour les **produits stables à forte rotation** (« high runner ») **(20-21)**. Sur les produits à faible rotation certains y voit un avantage quand d'autres les excluent a priori.

Réflexions

Ces entretiens semblent valider le caractère adaptable de DDMRP. Le placement des buffers semble jouer un rôle essentiel dans cette adaptabilité.

Interface

P1-P2

Il n'y pas de consensus sur les caractéristiques de contextes industriels pour lesquels DDMRP serait particulièrement pertinent. En ce qui concerne le profil de la demande et la complexité, les experts ne sont pas unanimes. Ces 2 caractéristiques du contexte industriel ont-elles une influence sur la performance de DDMRP et donc sur sa pertinence ?

Phase P1-4 Visites sur sites

4 visites sur sites utilisant DDMRP ont permis de mieux comprendre l'utilisation de DDMRP. Le Guide Thématique et les questions des interfaces ont permis de recueillir les informations.

Description-Analyse

Les 4 sites industriels visités ont tous déployé DDMRP sur des pilotes et 2 d'entre eux ont étendu le périmètre à d'autres références.

(1) Concentrant l'objectif de réduction des stocks, les responsables nous ont fait savoir qu'ils n'avaient **pas forcément obtenu des résultats** tout de suite et certains ont même constatés des hausses lors de la mise en place. Ils confirment tous l'amélioration de la **qualité des stocks** évoquée par les experts et témoignent de l'amélioration des flux.

(4) Capacité finie : les entreprises rencontrées nous ont fait part du **manque d'outil de gestion de la capacité**. Pour elles, DDMRP ne permet pas de gérer la capacité et elles doivent trouver des solutions pour pallier ce problème. L'une d'entre elle recourt à des contrats de production hebdomadaires qui fixent l'encours maximum admissible. Classiquement, elle lisse ensuite la charge afin de réaliser les ordres. Une seconde entreprise nous explique **adapter la taille des équipes** en cas de surcharge. Le poste concerné est manuel et en cas de surcharge, la **polyvalence** qui a été mise en place permet de réaliser les ordres plus importants générés par DDMRP.

Si DDMRP ne requiert pas de **prévisions (3)**, les entreprises nous ont confié qu'elles utilisaient toujours leur ERP pour faire des prévisions à plus long terme. **La visibilité limitée à DLT avec DDMRP ne permet pas d'anticiper suffisamment pour adapter la capacité** ou ni d'envoyer des prévisions aux fournisseurs. Ainsi DDMRP, leur apparaît comme dépendant de l'ERP pour la gestion de la capacité à moyen et long terme. L'une d'entre elle souhaitait étendre la démarche aux autres couches de DDAE pour éviter cette dépendance à l'ERP qui alimente la résistance au changement.

Concernant la mise en œuvre, une entreprise nous a expliqué avoir recours à des cartes Kanban pour gérer les ordres des produits non bufferisés. Ce système hybride lui permet de synchroniser ses flux. **Cependant, DDMRP lui-même, bien que compatible avec Kanban, n'est pas un système à cartes (9).**

Concernant le **système de contrôle (10)**, Il est visuel mais ne comporte pas de système à cartes. Il fait l'unanimité parmi les entreprises visitées. Le mode de calcul de la priorité amène une **objectivité incontestable** qui ramène le calme au sein du service de planification et tempère les échanges avec l'atelier.

Les ateliers visités étaient tous des ateliers de **production discrets (14)** avec 2 types d'**organisation d'atelier (15)** : 1 flowshop et 3 jobshops. La taille très réduite de l'échantillon ne permet pas de conclure de façon certaine mais démontre que DDMRP est utilisable dans les 2 cas.

Concernant le **profil de la demande (21)**, ils confirment tous avoir lancé le pilote sur des produits à forte rotation mais aucun n'avait inclus les low runners qui restaient exclus même après extension de la méthode.

Certains nous ont également fait part de leur réticence à bufferiser des produits encombrants ou à forte valeur. Le montant immobilisé dans le buffer représente autant de trésorerie non disponible ce qui représente un enjeu majeur pour un certain nombre d'entreprises.

Réflexions

Deux points divergent de la vision acquise jusqu'à présent. Le premier concerne la gestion de la capacité. À l'épreuve des faits, DDMRP ne possède pas d'outils permettant de gérer le rapport charge/capacité ce qui conduit les entreprises à trouver des alternatives.

Par ailleurs, DDMRP prône l'absence de recours aux prévisions celles-ci étant par essence fausses. Cela étant, dans la réalité, **les entreprises continuent d'établir des prévisions avec leur ERP pour gérer la capacité à plus long terme et les approvisionnements. Elles utilisent donc DDMRP en parallèle de leur outil existant** ce qui entretient chez certains la résistance au changement. Les 2 outils coexistant et ne délivrant pas la même information, certains planners continuent de se référer à l'ancien système, au mois au début.

Phase P2-6 Complexité de la Gamme

Le plan d'expériences mené pour tester l'impact de la complexité de la gamme repose sur 2 paramètres à savoir : la largeur et la densité de la nomenclature compte tenu d'une hauteur de nomenclature importante (12 niveaux). Pour chaque paramètre 3 niveaux ont été fixés :

Paramètres	Faible	Moyen	Fort
Largeur	4	8	12
Densité	0	0.3	0.6

Pour chaque combinaison, 15 nomenclatures ont été créées aléatoirement. L'emplacement des buffers est déterminé automatiquement pour que le DLT soit inférieur à 4 périodes. À chaque réplication, l'une des 15 nomenclatures est tirée aléatoirement.

Les Lead Times de chaque produit ont été fixés à 1 période que ce soit pour les articles achetés ou fabriqués. La production est réalisée avec des machines dédiée à chaque produit. Les temps opératoires unitaires sont déterminés à partir de la consommation hebdomadaire et d'une capacité disponible de 80% du temps d'ouverture (39h) soit 31.2h par semaine.

Les niveaux de variabilité sont considérés comme moyens et fixés pour la demande client à +/- 15%, et pour les délais fournisseurs et process à +/- 20% de la moyenne

Description-Analyse

Le plan d'expérience mené sur la complexité de la Gamme montre que la complexité de la gamme du produit représentée caractérisée par une **hauteur (17)** importante (12 niveaux), une **largeur (17)** (4 à 16 branches) et **densité (18)** (de 0 à 60%), n'influence pas l'OTD qui reste à 100%

Concernant le niveau de stock par référence, la largeur n'est pas influente mais la densité engendre des variations de l'ordre de 17 points entre une densité faible et une densité forte.

Réflexions

Deux hypothèses majeures sous-tendent le plan d'expérience mené. La première est la faiblesse des délais unitaires conduisant à des DLT faibles et la seconde est la spécialisation des ressources sur une seule référence ce qui simplifie le flux de production. Ces hypothèses ne sont représentatives de la complexité de certains systèmes de production

Les résultats pourraient être assez différents avec des délais plus importants ou un partage de ressources productives. Des expériences complémentaires doivent être menées pour confirmer l'absence d'impact de la complexité de la nomenclature.

Phase P1-5- Survey 88 cas industriels

Description et Analyse

La **base de données** complète des cas d'implantation de DDMRP constituée grâce à la méthodologie proposée dans l'Étude Qualitative et à l'ensemble des sources recense 88 cas industriels. **L'étude de cette base de données a permis de confirmer qu'il n'existe ni de profil type d'entreprise utilisatrices de DDMRP ni de process industriel clairement favorable.**

L'ensemble des données et leur analyse est disponible dans le document de travail [P1-2 Survey.docx](#). Nous retenons ici seulement les éléments essentiels :

(11) Taille de l'entreprise : Les ETI qui comprennent entre 250 et 4999 représentent près de 40% de l'échantillon. Elles dominent, mais les grandes entreprises et les PME sont quasiment représentées à parts égales. Concernant les PME (moins de 250 salariés), il s'agit essentiellement d'entreprises ayant dépassé la centaine d'employés. L'étude n'a retrouvé qu'un seul cas de mise en place en entreprise de moins de 50 salariés, mais il s'agissait d'un site appartenant à un petit groupe qui n'annonce pas sa taille réelle.

(12) Secteur d'activité : A priori le système DDMRP semblerait plutôt adapté pour l'industrie avec Phase d'assemblage étant donné qu'il est question de points de découplage qui s'intègre particulièrement bien dans les industries avec des sous-ensembles. Si ce type d'industrie est majoritaire avec 37%, des cas d'implantation, DDMRP est en réalité largement adopté par d'autres secteurs. On retrouve en effet près de 30% d'industries de transformation (chimie et matériaux), mais également des cas dans la distribution ou les produits de grande consommation ou encore dans l'industrie pharmaceutique. Dès lors le critère secteur d'activité semble peu pertinent pour définir le profil type d'entreprises DDMRP.

(13) Mode de réponse à la demande : A l'issue du chapitre 2, nous avons retenu 2 stratégies extrêmes de réponse à la demande Make to Stock (MTS) vs Make to Order (MTO) ainsi qu'un certain nombre d'alternatives basées sur le positionnement du point de découplage. Compte tenu de la Phase PO-1-Appropriation des concepts, il paraît probable de trouver une majorité de cas dans les alternatives. L'analyse des cas d'implantation amène pourtant une vision différente : On constate que 43 entreprises, soit 49% des cas, sont en MTS mais décrites comme MTF c'est-à-dire basées sur des prévisions. Le MTO est sous représenté avec seulement 17 entreprises soit 19%. Notons que les cas MTS-MTO correspondent en réalité, d'après les informations recueillies, à des systèmes ATO avec une partie en flux poussé et une partie en flux tiré ce qui porterait le nombre de cas ATO à 16, également sous-représentés. 3 entreprises expliquent gérer des flux mixtes c'est-à-dire une partie en MTS et une partie en MTO. Concernant le cas EO, **les auteurs de DDMRP pensent qu'il peut être utile pour le stockage des matières premières**. Cependant, **il n'existe aucun cas dans la base de données**.

(14) Mode de production : l'analyse des cas fait état d'une répartition égale entre les mode discret et continu.

Réflexions

L'absence de TPE (-10 salariés) dans l'échantillon pose question. Les raisons de cette absence pourraient être :

- liées à l'absence réelle de l'utilisation de DDMRP. Cette méthode est peut-être surdimensionnée par rapport à leurs besoins réels ou bien le manque de maturité et/ou une absence de moyens ne leur permettent pas d'avancer sur ce type de sujet,
- liées à une absence de communication sur leurs expériences DDMRP.

Phase P2-7 Profil de la demande

Ce plan d'expérience a pour but de définir si la performance Client de DDMRP est influencée par le profil de la demande défini selon 4 facteurs (21) Profil de la demande, (22) variabilité, (23) horizon de visibilité et (24) Volume.

	Facteurs			
	Profil de la demande	volume	qualité de la prévisions	Visibilité demande vs DLT
		Coefficient de volumétrie	Coefficient à appliquer sur la prévision	Horizon ferme/DLT
modalités	P	V	Q	V
1	Stable (100/semaine)	Faible 1	bonne Uniforme (0,95,1,05)	>1 DLT 3 semaines Horizon (5 semaines)
2	ramp-up (de 80 à 120 sur 24 mois)	Moyen 10	moyenne uniforme(0,95;1,15)	=1 DLT 3 semaines 3 semaines
3	Saisonnalité (1 pic saisonnier de +20% sur 10 semaines)	Fort 100	Faible uniforme (0,5,1,5)	< 1 Donc DLT 3 semaines 1 semaine

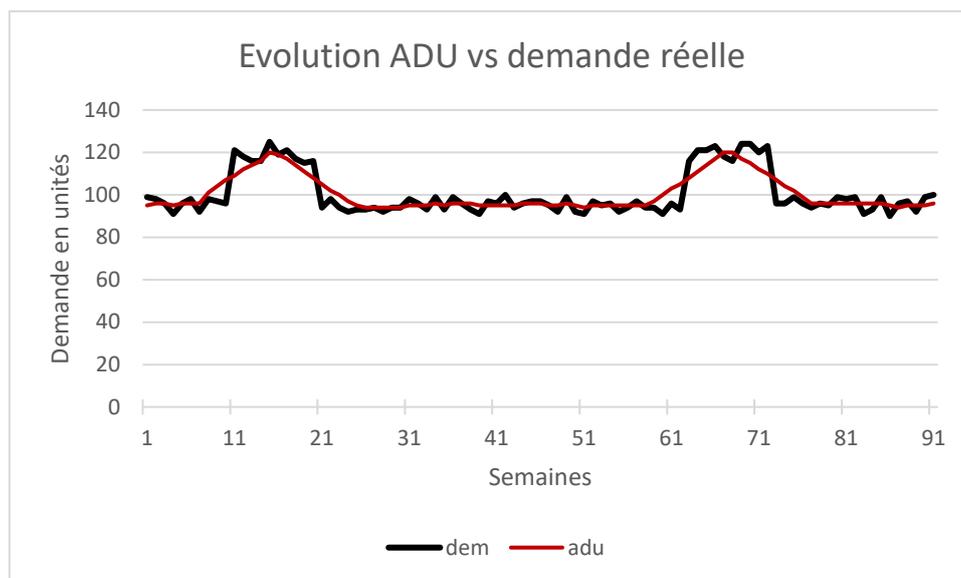
La base de la demande est de 100 pièces par semaine (modulo le profil) à laquelle viennent ensuite s'appliquer les coefficients de volume et de qualité de la prévision.

Concernant la visibilité, il s'agit de déterminer à quel moment l'entreprise a connaissance de la demande réelle, ce qui conduit à affermir les ordres et à ne plus prendre en compte la prévision.

Description-Analyse

Ce plan montre l'importance de l'**horizon de visibilité (23)** quel que soit le niveau des autres facteurs. En effet si la visibilité de la demande est inférieure au DLT alors l'OTD s'effondre. Il apparait donc **essentiel de considérer ce paramètre dans le placement des buffers**.

(21) Profil de la demande : avec une visibilité suffisante (\geq DLT), le plan d'expériences montre de bons résultats pour le profil stable et ramp-up quel que soit le niveau des autres facteurs (OTD moyens respectifs, 100% et 99.7%). Par contre, le profil saisonnier obtient de moins bons résultats 84.3% malgré la prise en compte du facteur d'ajustement planifié. Il semblerait que le calcul dynamique de l'ADU minimise le buffer.



(22) **Variabilité de la demande** : elle n'est pas influente tant que la visibilité est bonne c'est-à-dire ≥ 1 . Paradoxalement en cas de forte variabilité, l'OTD s'améliore (13% à 30%). Ce phénomène laisse supposer que les grandes variations (+/- 50%) permettent une certaine compensation lorsque la visibilité est faible, les périodes creuses peuvent ainsi être davantage chargées au dernier moment.

(24) **Volume** : sur le plan d'expérience réalisé, aucun effet de seuil n'a été constaté sur des volumes allant de 100 unités à 10 000 unités par période. Cependant, le choix de modalités du paramètre n'a pas permis de tester les très petites quantités (quelques unités par semaine).

Réflexions

3 Interfaces

P0-P1

Q2 : DDMRP est-il réellement compatible avec tous les environnements productifs

Q3 : les entreprises utilisatrices ont-elles un profil-type ?

Q5 : l'objectif de la baisse des stocks est-il atteint dans les contextes industriels ?

P1-P2

Q4 : les caractéristiques de la demande ((21) profil, (22) variabilité, (23) horizon de visibilité (24) volume)) ont-elles une influence sur la performance de DDMRP ?

Q5 : Une baisse des stocks est-elle constatée dans d'autres simulations ?

Q6 : le placement des buffers, qui joue un rôle majeur dans l'adaptabilité des DDMRP aux différents environnements productifs, a-t-il une influence sur sa performance ?

D3 Synthèse des « Éléments constitutifs »

1 Synthèse

- Nature Utilisation	Imposé	Déterminé	
		Paramètre (obligatoire ou optionnel)	« critère de choix »
Paramétrage	(1) Consommation moyenne (CMJ) (P0-1-A) (2) Nomenclature (P0-1-A)	(3) Placement des buffers (4) LT (5) DLT (6) Facteur de variabilité (7) Facteur de délai (8) Taille de lot (9) Cycle de commande (10) Horizon de calcul de la CMJ (11) Seuil de pic (12) Horizon de pic	Heuristiques (P0-1-A, P0-2-A, P1-3-A), DLT (P2-5-A) Fiabilité des délais (P2-2A) Lié aux placement des buffers (P0-1-A, P1-3-A, P2-5-A) Variabilité demande (P0-1-A, P2-12-C) Longueur des délais (P0-1-A) Temps et cout de réglage ou contrainte technique P0-1-A Fréquence souhaitée (P0-1A) 3 grands options (P0-1-A) 3 options (P0-1-A, P2-9-C) Minimum DLT de la référence (P0-1-A)
Pilotage	(13) NFE = Stock physique + réapprovisionnement en cours – besoins qualifiés Besoins qualifiés = retard + ordre du jour + pics qualifiés Pics qualifiés = sur un horizon défini (celui de prise en compte des ordres réels) quantité totale d'une journée qui dépasse le seuil de détection de pic (en général = 50% zone rouge) TOG et TOY (P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	L'ensemble des éléments utilisés dans le calcul sont définis lors de la Phase de paramétrage, la décision repose donc sur le paramétrage(P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	

2 Itérations

Phase P0-1 Appropriation des concepts

Description-Analyse

Le paramétrage de DDMRP fait apparaître 2 éléments imposés et pas moins de 10 choisis par l'entreprise dont 3 optionnels.

Parmi les paramètres imposés on retrouve classiquement la consommation moyenne et la nomenclature.

(1) **Consommation moyenne** : représente la demande moyenne pour une référence. D'après DDMRP elle est journalière mais la fréquence peut être adaptée en fonction des délais industriels. Elle

s'impose à l'entreprise mais peut être influencée par le paramètre horizon de calcul. La consommation est présente dans toutes les zones du buffer, elle influence donc fortement le dimensionnement.

(2) **La nomenclature** : comme indiqué dans l'acronyme DDMRP, ce PPC s'appuie partiellement sur MRP2 en ce qui concerne la notion de dépendance des besoins. La nomenclature des articles est utilisée pour le calcul des articles dépendants. L'originalité de DDMRP réside dans le fait que l'explosion des besoins est stoppée à chaque buffer pour éviter la propagation de l'effet coup de fouet.

Parmi, les paramètres choisis, 6 sont directement nécessaires au dimensionnement des buffers et tandis que les autres influencent la future prise de décision.

(3) **Le placement des buffers** : la première étape du paramétrage de DDMRP est le placement des buffers qui permet de découplage au sein de la nomenclature. La méthode fournit des heuristiques basées sur 6 éléments pour guider les choix (délai de tolérance client, Lead délai d'opportunité de marché, horizon de visibilité des commandes, variabilité externe client-fournisseur, point de levier et de flexibilité du stock, protection des opérations critiques ».

Une fois les emplacements de buffers déterminés, il s'agit de choisir les différents paramètres qui permettront le fonctionnement de DDMRP. Le schéma suivant replace les éléments de dimensionnement des buffers:

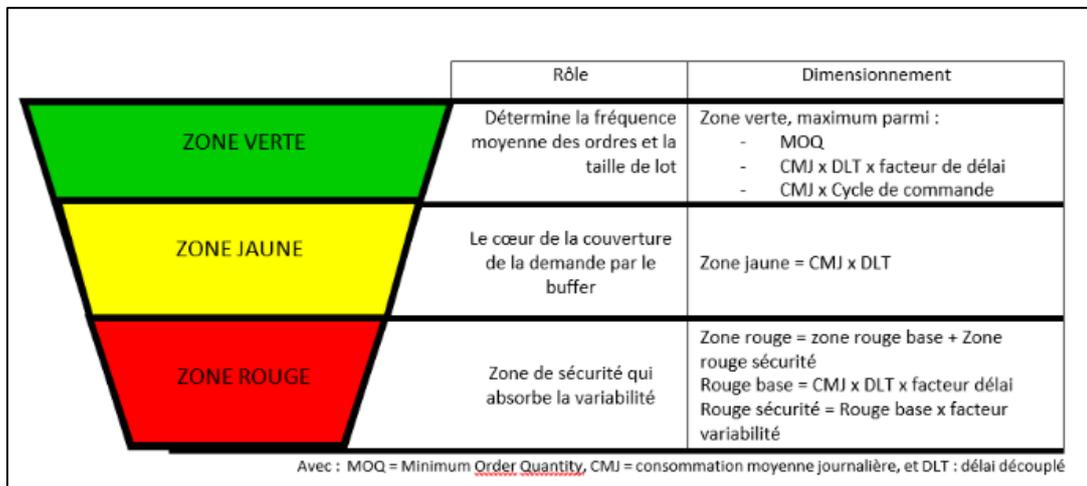


Figure Le dimensionnement des buffers d'après Ptak et Smith 2016

(4) **Lead Time** : il s'agit ici du lead time de planification c'est-à-dire le *délai prévu* entre le lancement de l'ordre et sa mise à disposition. Il comporte l'ensemble des temps opératoires, de transports et des temps d'attente pour les articles fabriqués et le temps entre la passation de commande et la réception effective pour les articles achetés. On le considère comme choisi, car il est souvent déterminé de façon empirique et comporte une part de sécurité. Le Lead Time est parfois assez éloigné des temps opératoires. Cependant, ce Lead Time n'est pas spécifiquement déterminé pour DDMRP, c'est un paramètre connu pour chaque référence par l'entreprise avant la mise en place de DDMRP. Cependant, la réflexion autour des flux engendrés par DDMRP peut conduire à le réévaluer lors de l'implantation ou plus tard en Phase d'exploitation (P1-Etude Qualitative).

(5) **DLT (Délai découplé)** : c'est un concept original de DDMRP basé sur le positionnement des buffers. Il s'agit de la plus longue séquence de la nomenclature non protégée par un buffer. Il inclut le Lead Time de la référence bufferisée ainsi que ceux de tous ses composants non bufferisés. Il correspond par conséquent au temps d'obtention de la référence en l'absence de stock. Nous le considérons comme choisi par l'entreprise car d'une part il est dépendant du placement des buffers et d'autre part, il repose sur les Lead Time de la référence et de ses composants.

(6) **Facteur de délai** : il est utilisé en combinaison avec le DLT et la consommation moyenne pour déterminer le stock de sécurité minimum d'un buffer et l'une des options de la zone verte. La zone verte représente la taille minimum de l'ordre qui sera lancé lorsque la position de l'équation de flux (NFE) sera en dessous du Top du Jaune. Dès lors, ce facteur est inversement proportionnel à la longueur du

délai, l'objectif étant que plus le délai est long, plus on cherche à minimiser la taille de l'ordre pour obtenir des ordres moins grands et plus fréquents ce qui permet davantage de réactivité. DDMRP donne des fourchettes pour le Facteur de délai mais précise qu'il peut être adapté en fonction du contexte de l'entreprise (20 à 40% pour de délai long, 41 à 60% pour un délai moyen et 61 à 100% pour un délai long). Les écarts de coefficients conduisent par conséquent à des variations des quantités lancées de l'ordre de 80% (100-20 différence entre les 2 extrémités proposées).

(7) **Facteur de variabilité** : il est utilisé pour déterminer la zone rouge c'est à dire l'équivalent du stock de sécurité. DDMRP propose un exemple de grille permettant de le déterminer en fonction de 3 niveaux de variabilité. Cependant, le choix des niveaux et la valeur des coefficients sont subjectifs car liés au contexte de l'entreprise. Dans l'exemple donné par (Ptak and Smith, 2019), le coefficient est de 0.25 pour une faible variabilité, 0.5 pour une variabilité moyenne et 0.75 pour une variabilité forte. Compte tenu des formules de calculs de la zone rouge cela conduit à augmenter le stock de sécurité de 25 à 75% en fonction de la catégorie retenue.

(8) **Taille de lot** : elle est optionnelle et même déconseillée par (Ptak and Smith, 2019). Cependant, elle correspond à une réalité pour certaines entreprises qui pour des raisons techniques ou économiques ne peuvent pas se passer de taille de lot. Notons qu'il s'agit d'une taille de lot minimum et non d'un lot technique. Les formules de lancement utilisées par DDMRP ne garantissent pas le respect du lot technique.

(9) **Cycle de commande** : il est lui aussi optionnel mais peut correspondre à une réalité industrielle.

(10) **Horizon de calcul Consommation Moyenne** : 3 grandes options sont proposées par DDMRP. Il s'agit de prendre en compte le passé, le futur ou un mix des 2. Empiriquement, il est démontré qu'un horizon trop court risque de faire varier grandement la consommation moyenne et donc de favoriser l'effet bullwhip. Inversement un délai trop long lisse les variations et ne permet plus l'ajustement dynamique du buffer. Le constat est posé mais l'impact sur le dimensionnement des buffers et sur la performance quantitative n'est pas abordé (P0-Characterisation et P1-Etude Qualitative). Seuls (Damand et al., 2022) démontre que pour un même horizon l'option choisie n'a pas d'effet sur la performance.

(11) **Seuil de pic** : il s'agit d'une limite utilisée pour identifier les demandes trop importantes pour être absorbées par le buffer à la date demandée. Il s'agit donc d'identifier cette demande et de l'anticiper afin de respecter la date demandée. Là encore 3 options sont proposées (50% de la zone rouge, option par défaut, nombre de jours de consommation moyenne ou pourcentage défini de la zone rouge). (Ptak and Smith, 2019) explique que le choix n'a finalement que peu d'importance « *si DDMRP est correctement construit, managé et adapté* ». Cependant, on peut raisonnablement penser que l'influence est réelle. En effet en intégrant des ordres supplémentaires, représentant un certain pourcentage de la zone rouge, au sein d'une demande périodique, la quantité calculée pour l'ordre est forcément plus importante.

(12) **Horizon de pic** : il s'agit de déterminer le nombre de périodes examinées pour repérer les pics. La recommandation est de le fixer au minimum à la DLT de la référence considérée. Plus l'horizon est lointain, plus l'anticipation est importante et donc le stock également.

(13) **NFE** : La décision de lancement des ordres est uniquement basée sur les paramètres déterminés en amont. Elle fait l'objet d'une nouvelle approche combinant une formule originale appelée NFE (Net flow Equation ou Equation de Flux Disponible).

$$NFE = \text{Stock physique} + \text{réapprovisionnement en cours} - \text{besoins qualifiés}$$

avec

$$\text{Besoins qualifiés} = \text{retard} + \text{ordre du jour} + \text{pics qualifiés},$$

$$\text{Pics qualifiés} = \text{dépendant des paramètres (11) (12) (horizon et seuil de pic)}.$$

Ils représentent la quantité totale d'une période dont la demande dépasse le seuil de détection de pic (par défaut = 50% zone rouge)

L'équation est calculée à chaque période et intègre **uniquement des valeurs réelles** (stocks physiques, ordres de réapprovisionnement en cours et la demande du jour plus les retards) ce qui évite les imprécisions liées à l'utilisation des prévisions. Les règles de calculs des ordres sont simples :

- L'ordre n'est déclenché que lorsque $NFE \leq \text{Top du Jaune}$,
- Quantité est alors égale à $\text{Top du Vert} - NFE$

Réflexions

La demande étant servie sur stocks pour les articles bufferisés, les ordres sont lancés pour reconstituer le buffer et sont naturellement dus à la consommation réelle, d'où la notion de « Demand Driven ». Cependant, compte tenu des règles de déclenchements, la quantité n'est pas directement liée à la consommation de la période.

Si individuellement, l'impact individuel des facteurs de variabilité et de délai est mesurable, les conséquences de la combinaison des choix sur le dimensionnement des buffers ne sont pas si évidentes. Prenons un exemple extrême

Ex : un article avec CMJ = 100, DLT = 5

	facteur délai	facteur variabilité	zone rouge base	rouge sécurité	zone rouge	zone jaune	zone verte	total
Minimum	0,2	0,25	100	25	125	500	100	725
Maximum	1	0,75	500	375	875	500	500	1875

Dans cette exemple le niveau total du buffer est 2.5 fois plus élevé et la zone rouge qui représente un stock physique est 7 fois plus élevée avec les coefficients les plus importants.

Par ailleurs, la taille des ordres est 5 plus élevée dans le cas Maximum ce qui a nécessairement un impact sur le rapport charge/capacité.

L'exemple donné montre que la combinaison des paramètres conduit à un dimensionnement total et à une taille des ordres très différents mais n'ont aucun impact sur la zone jaune. Cet exemple théorique ne permet cependant pas d'évaluer les conséquences sur la performance client et industrielle.

En ce qui concerne la Zone Verte, la recommandation dans DDMRP est de choisir la plus grande des options parmi les 3 proposées. Dès lors, le recours à la taille de lot et/ou à des cycles de commandes ne sera pas pris en compte si le résultat du calcul $DLT * CMJ * \text{facteur de délai}$ est plus important que les deux autres options.

Interfaces :

PO-P1/D3

Le placement des buffers est la première étape du paramétrage de DDMRP. Comment les utilisateurs choisissent-ils leurs emplacements ? Suivent-ils les heuristiques de DDMRP ou déploient-ils d'autres méthodes ?

PO-P2/D3

Le choix de l'emplacement des buffers at-t-il une influence sur la performance ?

Phase P0-2 État de l'art

Description-Analyse

L'état de l'art réalisé sur près de 75 publications académiques relève qu'une minorité traite des éléments constitutifs de DDMRP :

- **4 du placement des buffers** (Achergui et al., 2021, 2020; Bayard et al., 2021; Jiang and Rim, 2017, 2016).
- **11 du paramétrage** (Bayard and Grimaud, 2018; Damand et al., 2022; Dessevre et al., 2021, 2020a; Guillaume Dessevre et al., 2019b; Favaretto et al., 2021; Lee and Rim, 2019; Martin, 2020; Martin et al., 2019; Vidal et al., 2020).
- **3 de questions opérationnelle**, c'est-à-dire liées à l'exécution de DDMRP et aux décisions (Azzamouri et al., 2022; Baptiste and Pellerin, 2018; Johansson and Södermark, 2019).

L'étude de ces publications contribue à la compréhension du rôle des différents paramètres et à préciser leur fixation.

(3) **Placement des buffers** : Cette problématique est minoritaire alors qu'elle est présentée comme la base de DDMRP. Seules 4 publications y sont totalement consacrées. (Jiang and Rim, 2017, 2016) proposent un modèle mathématique pur optimiser le placement des buffers. (Achergui et al., 2020) démontrent *l'intérêt de bufferiser les composants pour limiter le DLT* d'un semi-fini et ainsi réduire le stock. On note également que 2 publications qui évoquent ce sujet : (Velasco Acosta et al., 2019) **relient la performance en termes de réduction de stocks et de réduction des Lead Times au positionnement des buffers**. Pekarcikova et al. (2019) font remarquer qu'il n'est **pas toujours possible de positionner les buffers comme préconisé par les heuristiques**. Le fait d'avoir des délais au-delà de l'horizon de visibilité de la demande ne serait pas compatible avec les calculs de buffers.

Concernant les choix des autres paramètres, les publications sont plus nombreuses, la plupart cherche des solutions pour les préciser. (Favaretto et al., 2021) démontrent que les heuristiques proposés par DDMRP pour fixer les principaux paramètres sont efficaces pour fixer le niveau de stock comparativement à l'approche optimale qu'ils ont développée.

Cependant (Bayard and Grimaud, 2018) démontrent la possibilité de diminuer de près de 20 points les facteurs de variabilité et de lead time sans dégrader la performance client tout en améliorant le niveau de stock. (Damand et al., 2022) proposent un algorithme génétique pour fixer automatiquement à partir de l'historique 8 paramètres : (6) facteur de variabilité, (7) facteur de délai ; (9) cycle de commande, (10) horizon de calcul de la CMJ qu'ils décomposent en horizon dans le passé et dans le futur, (11) seuil de pic (12) horizon de pic. La solution proposée est efficace pour optimiser simultanément le stock et l'OTD.

(Lee and Rim, 2019) proposent une nouvelle approche mathématique pour le dimensionnement de la zone rouge des buffers car ils constatent que la subjectivité dans le choix des facteurs de variabilité (6) et de délai (7) conduit à des écarts de l'ordre d'un facteur 3 pour une même référence. Les résultats obtenus montrent une supériorité de leur proposition dans tous les cas sauf pour une faible variabilité.

Concernant la prise de décision, aucune publication ne se penche sur le mode de calcul de la NFE (13).

Plusieurs publications se penchent sur l'utilisation de DDMRP au travers les questions opérationnelles.

(Azzamouri et al., 2021) s'interrogent sur la fréquence d'examen du seuil de réapprovisionnement et concluent à un traitement différencié en fonction de la longueur de l'intervalle entre 2 commandes. (Dessevre et al., 2021; Guillaume Dessevre et al., 2019a) traitent du paramétrage dynamique en Phase d'exécution et concluent sur **la nécessité de jouer sur le taux de charge en adaptant la capacité plutôt qu'en faisant varier les paramètres**. Les travaux de thèse de (Martin, 2020) portent quant à eux sur le contrôle dynamique des paramètres CMJ (1), DLT (4) et facteur de délai (7). Ils

établissent **un arbre de décision sur le profil statistique de la demande et la charge du goulet** afin de déterminer les paramètres fixes et variables.

Réflexions

Les publications sur ces thématiques sont relativement récentes ce qui peut témoigner d'une certaine maturité de DDMRP : les questions liées au paramétrage et à l'utilisation concrète ne surviennent que lorsque le PPC est concrètement utilisé.

À ce stade, il apparaît donc que le paramétrage influence la performance et que des améliorations peuvent être apportés.

Le positionnement des buffers, qui est assez peu investigué, semble avoir un impact sur la performance. Il semble notamment pertinent de considérer l'horizon de visibilité lors du choix de leur placement des buffers y compris pour les composants

Interfaces

P1-P2/D3

L'impact du placement sur la performance des buffers n'est pas étudié. Le choix peut-il influencer la performance ?

Phase P2-1 Impact financier de DDMRP

Le plan d'expériences réalisé poursuit 2 objectifs. Le premier est de comparer, en contexte stochastique, la performance de DDMRP en termes d'OTD et de niveau de stocks face à 3 versions de MRP2 (absence de stock de sécurité, stock de sécurité empirique $LT \cdot \text{consommation moyenne}$, ou stock de sécurité probabiliste à 90%). Le 2^{ème} est de vérifier s'il est possible de diminuer de façon empirique les facteurs de variabilité (6) et de délai. La diminution est réalisée avec 4 paliers successifs de -0.05 points.

Description-Analyse

Concernant les problématiques de paramétrage de DDMRP, ce plan d'expérience montre que

- La baisse des paramètres Facteurs de Variabilité (6) et de délai (7) de -15 points améliore de 29% le niveau de stock sans dégrader l'OTD.
- Au-delà la baisse des facteurs induit une légère réduction de l'OTD.

Réflexions

Dans le cadre ce plan d'expérience, il semble donc que la baisse des facteurs de Variabilité (6) et de délai (7), soit réaliste et permettent une amélioration de la performance financière conjointe à celle de la performance client (OTD).

Phase P1-2 Étude de cas documentaires

Description-Analyse

L'étude des fonctions logistiques concernées par DDMRP dans les entreprises utilisatrices nous renseigne sur le placement général des buffers.

Ces fonctions peuvent être les Approvisionnements si les buffers concernent des pièces achetées, la Production pour les semi-finis et enfin la distribution pour les produits finis. L'analyse des cas nous renseigne sur le positionnement des buffers utilisés par les entreprises.

Fonctions concernées	Pourcentage d'Entreprises (sur 88 cas)
A	7%
A-D	4%
A-P	23%
A-P-D	29%
D	10%
NR	15%
P	5%
P-D	8%
Total général	100

Dans l'absolu c'est près de 30% des entreprises choisissent d'utiliser des buffers au niveau des 3 fonctions

Cependant le cas le plus fréquent, c'est le couplage de 2 fonctions qui représentent 33% des cas, avec 3 choix possibles le plus courant étant celui d'un couplage de buffers de pièces achetées et de semi-finis (A-P). Enfin l'utilisation d'un seul « emplacement » de buffer est peu courant surtout quand il s'agit des approvisionnements qui ne représentent que 4 cas. Si ces chiffres nous renseignent sur les choix effectifs des entreprises, ils ne nous informent pas sur les raisons de ce positionnement.

Réflexions

Phase P2-2 Études de cas Industriels

Description-Analyse

Dans les cas de 2 entreprises, avec DDMRP basé sur les paramètres standard, l'OTD n'atteint pas les 100% même en contexte déterministe et le stock est largement supérieur au stock réel et au stock MRP2 simulé.

Après analyse et échange avec les équipes de planification des entreprises, il s'avère :

- Le seuil de pic fixé à 50% de la zone rouge conduisait à une surélévation du stock de l'ordre de 63%. La décision a été prise de le porter à $LT*ADU$
- Les tailles de lot lancées sont largement supérieures à la capacité des moyens de production. Des tentatives de « capage » ont été réalisées pour l'entreprise 1 qui souhaitait poursuivre les investigations. La Phase P0-1 Appropriation des concepts fait apparaître la zone verte comme étant celle qui dimensionne la taille minimum des ordres et leur fréquence. Ainsi, la solution mise en place était de ne plus se conformer aux recommandations de DDMRP qui choisit le maximum parmi 3 options à savoir : $DLT*CMJ*LT$ ou MOQ ou $cycle\ minimum*CMJ$. Dans ce cas, nous avons imposé une règle au lancement qui limite le lancement 2 fois la consommation périodique. Les résultats sont bien meilleurs pour l'OTD et le stock en contexte peu variable mais l'OTD se dégrade face à une forte variabilité tandis que MRP2 simulé conserve sa performance.

Réflexions

La taille de lot issue des paramètres et de l'algorithme de DDMRP semble poser problème dans le contexte des entreprises étudiées. Elles sont toutes les deux concernées par une production rate based et par des faibles volumes périodiques. Ainsi les lots lancés sont trop éloignés de la consommation moyenne servant à dimensionner la capacité productive.

Le contexte particulier de ces entreprises pourrait expliquer la non corroboration des résultats quantitatifs trouvés en Phase P0-1. Le placement des buffers a une influence importante sur le niveau de stock. Peut-on généraliser ce constat ?

Interfaces

P2-P1

La taille des ordres générés par les paramètres de DDMRP semble être problématique. Ce phénomène est-il retrouvé chez les entreprises utilisatrices ?

P2-P2

La simulation montre-t-elle que la taille des ordres est systématiquement surdimensionnée ?

Phase P1-3 Entretiens semi-directifs

Les entretiens réalisés avec des experts consultants ou internes aux entreprises utilisatrices ont permis d'approfondir la compréhension des paramètres.

Description-Analyse

(3) Placement des buffers : Pour la majorité des experts, le placement se fait en fonction des heuristiques proposées par DDMRP et ce sont les experts internes qui arbitrent en fonction du type de variabilité rencontrée. En toute logique, pour se protéger de la variabilité des approvisionnements, les buffers sont placés sur les produits achetés. L'extension se fait ensuite en fonction des objectifs et des contraintes propres à chaque entreprise. Dans la quasi-totalité des cas, les buffers sont installés à plusieurs niveaux du process de production. L'un des critères de décisions est le coût des buffers qui est évalué grâce à la formule du stock objectif proposée par DDMRP. Cependant certains critères peuvent exclure certains produits des buffers : encombrement physique, coût du stock, trop forte variabilité conduisant à un buffer trop important

Concernant l'ensemble des autres paramètres, les experts disent suivre les recommandations et les ajustent assez facilement grâce à la visualisation de la situation de chaque buffer. Pour eux, il est beaucoup plus facile de se rendre compte du mauvais choix de paramètres que dans un système MRP2 qui est complètement opaque.

Réflexions

Globalement les heuristiques semblent suffisantes pour placer les buffers mais il n'y a pas de consensus sur les critères excluant un produit en tant que potentiel buffer.

Concernant les choix de paramètres, les experts suivent les recommandations. Or la Phase P2-2 a montré que la stricte application des paramètres recommandés conduit à une performance dégradée de DDMRP comparativement à la situation réelle des entreprises et à la performance simulée de MRP2.

Interfaces

P1-P2

D'après les experts, le placement des buffers se fait avec les heuristiques et il vaut mieux multiplier les buffers. Est-ce que ce que tous les choix conduisent au même niveau de performance ?

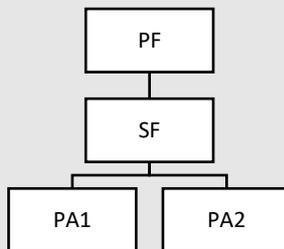
Phase P2-3 POC taille de lot

La taille de lot semble poser problème dans les cas industriels traités. Afin de mieux comprendre le phénomène, un POC a été réalisé sur une nomenclature simple.

Description-Analyse

Ex : un produit PF avec $CMJ = 100$, $DLT = 5$

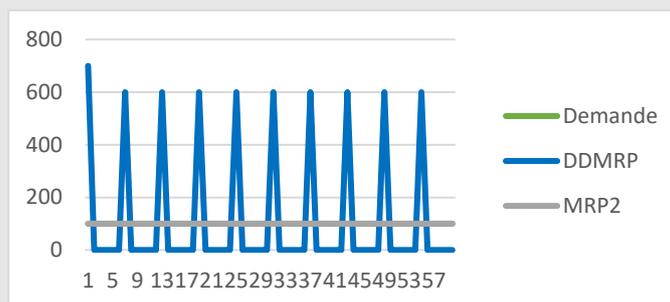
La nomenclature est simple avec des coefficients 1 à chaque lien, et un délai (LT) de 5 jours pour chaque article



Seul le produit fini est bufferisé, les zones du buffer sont les suivantes

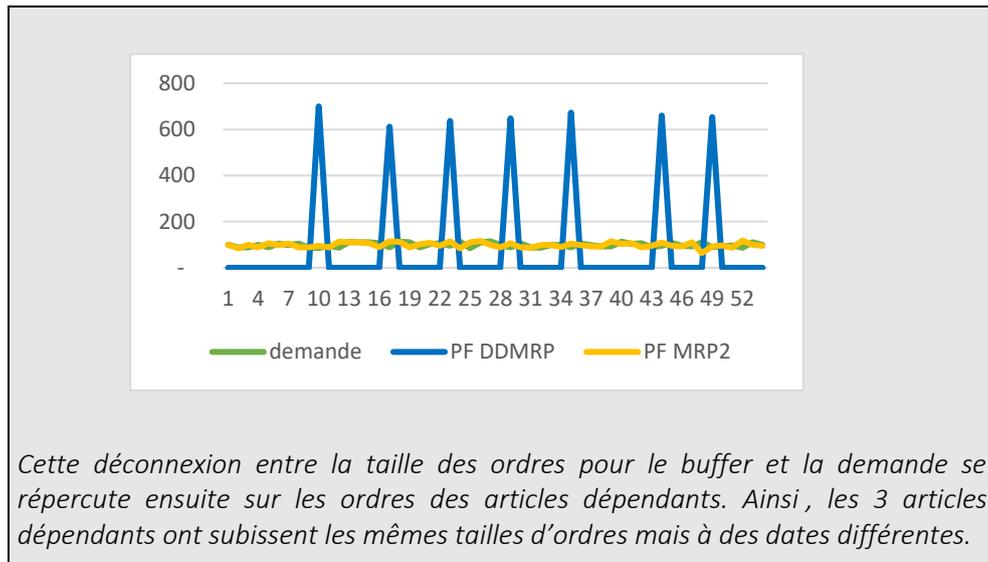
TOR	TOY	TOG
900,0	2 400	3 000,0

La simulation menée sur 60 périodes avec une consommation déterministe de 100 pièces par semaine conduit à des tailles d'ordres largement supérieures à celles générées par MRP2.



On constate que les ordres générés par DDMRP sont beaucoup plus importants que la demande soit 600 pièces par lancement (taille de la zone verte) pour une demande de 100 pièces par période.

En contexte stochastique avec des variations de +/-20% autour de la moyenne, le constat est sensiblement le même. Les ordres de MRP2 sont réguliers et autour de la demande réelle tandis que les ordres de DDMRP pour le produit fini bufferisé sont 6 fois supérieurs à la demande moyenne



Le problème de la taille de lot révélé par P2-2 est confirmé par le POC réalisé sur un cas simple. Les ordres générés par DDMRP en suivant les recommandations conduisent à des ordres moins fréquents mais plus importants dans le cas où la demande est régulière.

Le fait de recourir au maximum entre les 3 choix possible pour la zone verte conduit probablement, dans un certain nombre de cas à retenir $DLT \times CMJ * LTF$ comme étant le maximum notamment pour les entreprises qui ont des délais longs. Or ce maximum dépend de 2 paramètres :

(5) **DLT** : le DLT résulte lui-même de 2 facteurs :

(3) **Le placement des buffers** : il influence directement le DLT puisqu'il inclut les LT des articles dépendants jusqu'au prochain buffer. En multipliant les buffers au sein d'une même nomenclature, on peut réduire le DLT ce qui est conforme

(4) **le LT** de chaque article : c'est généralement un paramètre déjà connu dans le système mais souvent surévalué qui conduit à majorer le DLT des buffers. Un travail sur la fiabilisation des LT peut permettre de réduire le DLT et donc la taille des ordres

(7) **le Facteur de Délai** : le POC confirme qu'il est nécessaire de minimiser le facteur pour limiter la taille des ordres. Dans l'exemple, il était fixé à 40%, la diminution à 20% permet de diminuer la taille des ordres de moitié.

Réflexions

Ce constat concernant la taille des ordres pourrait expliquer que la question de l'applicabilité de DDMRP dans le cas des délais longs ait été soulevée (Pekarcikova et al., 2019).

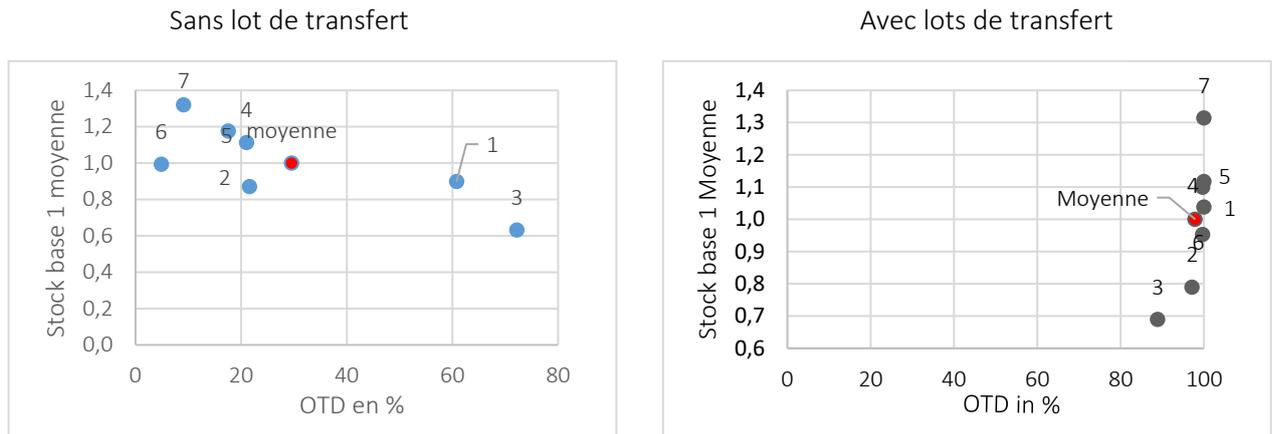
Par ailleurs, ce POC démontre une fois de plus l'impact du placement des buffers et du choix des paramètres sur la taille des ordres et donc sur la charge qui pèse sur l'atelier.

Enfin, la confirmation du phénomène peut questionner dans le cas de systèmes de production rate based pour lesquels l'augmentation de la taille des ordres peut être problématique. La création de lot de transfert proche de la demande moyenne peut permettre de régler le problème mais pose la question de la pertinence de DDMRP dans ce contexte.

Phase P2-4 POC lot de transfert

Description-Analyse

L'efficacité de la création des lots de transfert a été testée sur le même PE qui a été traité 2 fois : une fois sans lot (P2-4) et une fois avec (cf. P2-5) pour comparer les résultats obtenus. Le résultat est sans appel.



Les résultats montrent que les lots de transferts apportent une réponse satisfaisante au problème de la taille des ordres. La quasi-totalité des scénarios voit l'OTD s'améliorer et atteindre des niveaux acceptables industriellement.

Réflexions

Les tests menés en amont du plan d'expériences définitif sur les buffers confirment la nécessité de créer des lots de transferts au moins pour le cas des demandes récurrentes. La question de l'applicabilité dans l'industrie se pose : bien que cette solution soit connue et utilisée, elle peut engendrer des problèmes liés à la traçabilité et d'adaptation de système d'information.

Phase P2-5 Impact du placement des buffers

L'objectif de ce plan d'expérience est de vérifier l'impact du **placement des buffers (3)** sur les performances client (OTD) et financière (niveau de stock) face à 3 types de variabilité (client-fournisseurs et process) à 3 niveaux (faible +/-5 %, moyenne +/-15%, forte +/-50%).

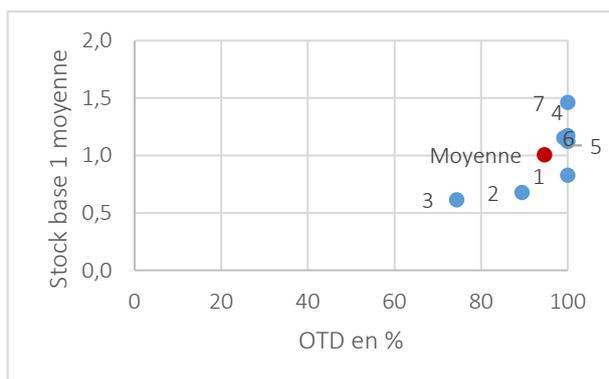
7 choix de placement de buffers ont été testés : produit fini, semi-fini ou référence achetée uniquement, ou combinaison de ces 3 choix. 2 cas in-vitro différents ont été testés : le 1^{er} issu de l'exemple de la Compagnie ABC tiré de (Ptak and Smith, 2019) comportant 10 références dont 6 fabriquées et 4 achetées et le second 31 références dont 23 fabriquées et 8 achetées.

La demande étant récurrente autour de 100 pièces par semaine dans ces cas d'étude. Des lots de transferts ont été mis en place pour éviter le phénomène « taille de lot ».

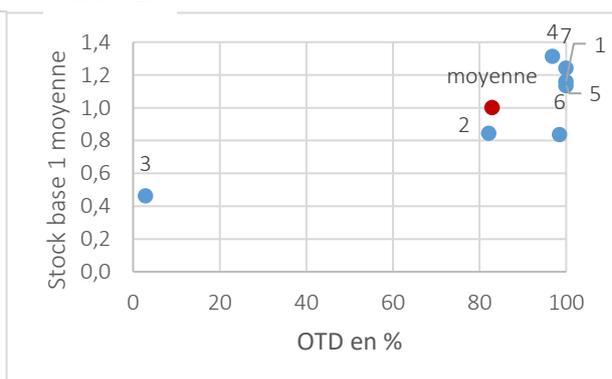
Description-Analyse

Dans les 2 cas testés, les résultats sont sensiblement identiques :

Cas n°1



Cas n°2



- **Les placements avec plusieurs buffers et le buffer sur le produit fini permettent d'atteindre un OTD parfait** quel que soit le type et le niveau de variabilité. Par contre, le classement des placements de buffers en ce qui concerne le niveau de stock est très différent entre les 2 cas. Le nombre d'articles, leur cout unitaire et les temps opératoires ne sont pas les mêmes. On ne peut donc pas conclure sur cet aspect financier.
- **Le buffer uniquement sur les produits achetés minimise le montant des stocks mais ne permet pas d'atteindre des niveaux d'OTD satisfaisants.** Dans l'un des 2 cas, il est particulièrement mauvais (<10%) contre 75% dans l'autre. Les paramètres DDMRP utilisés étant les mêmes, la question d'un tel écart se pose. L'analyse de la taille des buffers apporte une explication plausible.

Pour une même demande, dans le 1er cas, la zone rouge du buffer est de 1 219 pièces contre 88 dans le second cas car le DLT du produit acheté est très différent (1 période contre 30 périodes).

Les données d'entrée ne montrent pas d'écart évident entre les lead times restant après le buffer (8 périodes contre 6) ce qui conduit à couvrir 152 fois le lead time post buffer soit 1.5 fois la consommation moyenne dans le 1er cas et seulement 14,7 fois, soit 0.15 fois la consommation moyenne dans le 2ème cas.

Il semble donc que la position du buffer ne soit pas le seul paramètre influent dans le cas du buffer *uniquement* situé sur les articles achetés. La couverture par le buffer du Lead Time Total de fabrication (i.e. somme des LT unitaires de la branche la plus longue) soit également à intégrer à la réflexion. Un Lead Time faible sur des produits achetées conduit à un DLT faible donc à une faible couverture du risque.

- Le buffer sur semi-fini est globalement efficace mais résiste moins bien à la combinaison de fortes variabilités fournisseurs et process.

Réflexions

Donner des règles générales de placement de buffers concernant la performance financière n'est pas réaliste car dépendant de la situation de chaque entreprise. Des simulations préalables doivent être réalisées.

Les résultats catastrophiques d'un placement de buffer sur les articles achetés en termes d'OTD pour l'un des 2 cas pose une nouvelle fois la **question de l'impact du DLT (5)** tant du point de vue de la performance financière que du point de vue de la performance client. Ici il semblerait qu'en cas de **DLT faible sur les buffers d'articles achetés** conduise à une **insuffisance de couverture du risque post-buffer**.

Phase P1-4 Visites sur Site

4 visites sur site d'entreprises utilisatrices de DDMRP ont été effectuées donnant lieu des échanges nombreux et à des observations in situ. Le Guide Méthodologique et les questions déjà soulevées ont appuyés les échanges.

Description-Analyse

Concernant le Délivrable D3, « Éléments constitutifs », les entreprises utilisatrices nous ont confirmé utiliser les recommandations de la méthode et des experts pour paramétrer et utiliser DDMRP.

Elles confirment adapter les paramètres a posteriori si la visualisation du buffer montre une dérive. Parmi les paramètres disponibles, elles utilisent essentiellement les paramètres **(6) facteur de variabilité et (7) facteur de délai** et utilisent la gestion par famille proposée par DDMRP.

Les planificateurs nous ont confiés ne pas toucher les autres paramètres disponibles par **manque de compréhension** de l'impact potentiel.

Réflexions

Phase P2-9POC seuil de pic

Description-Analyse

D'après les résultats issus des Phases P1-3 entretiens semi-directifs et P1-4 Visites sur sites, il a apparait que le paramétrage initial du **seuil de pic (11)** est effectué selon les recommandations par défaut de DDMRP à savoir 50% de la zone rouge, ce qui, d'après les experts et les praticiens est également le cas dans les entreprises au moins en Phase de pilote.

Au sein de P2-2 Étude de cas industriels, l'étude in-vivo menée sur l'entreprise 2, ce paramétrage du seuil conduit à une surélévation du **stockage de l'ordre de 60%** dû à une sur anticipation de la demande réelle et donc à une mise en stock plus précoce des articles. Dans ce cas d'entreprise, le choix de paramétrer ce seuil au niveau du TOR a amélioré la situation du stock sans dégrader la performance client.

Cependant, ce phénomène n'est pas identifié dans toutes les simulations. Nous avons donc cherché à le reproduire. Il est confirmé par un POC qui démontre qu'un seuil trop bas augmente le niveau de stock possiblement par anticipation des ordres, mais génère également une taille d'ordre moyenne plus importante qui surcharge le système.

Nous ne pouvons que relever l'existence du phénomène et l'expliquer, mais il faudrait des études approfondies pour formuler des recommandations précises quant au paramétrage du seuil de pic.

Exemple.

Buffer avec CMJ à 100 et DLT 3, facteur de délai 0.4 et facteur de variabilité 0.5

TOR	TOY	TOG
180	480	600

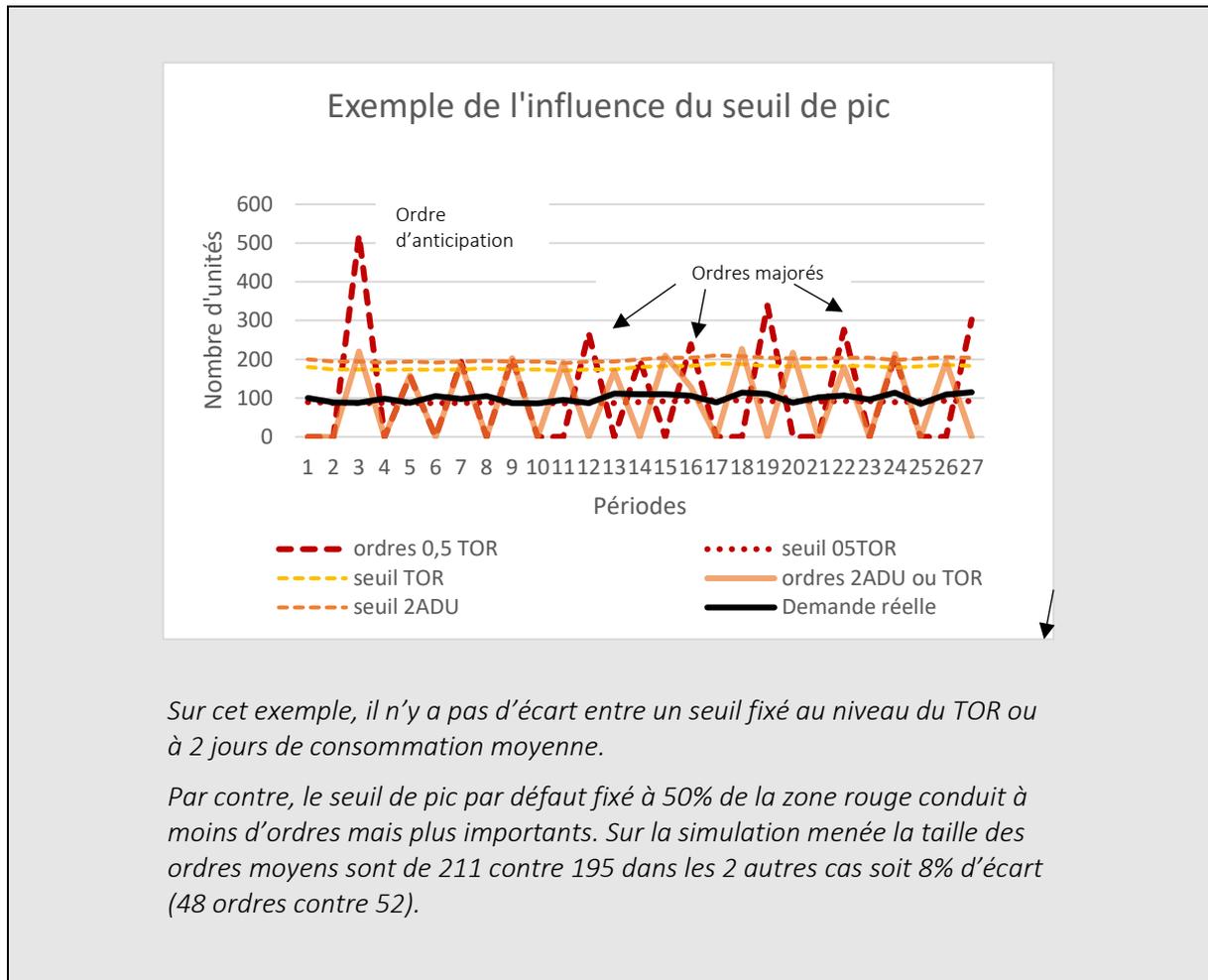
3 options de

sont testés conformément aux recommandations :

- *0.5 TOR soit 90 unités*
- *TOR = 180 unités*
- *2 jours de consommation = 200 unités*

seuil de pic

Ce seuil évolue dynamiquement en fonction de la demande réelle mais reste proche des valeurs initiales



Le rôle du seuil sur la taille des ordres est incontestable. Il est donc important de le paramétrer correctement. Des tests rapides sur le paramétrage font apparaître un rôle :

- **(5) Du DLT** : plus il est important plus la zone rouge est importante et éloignée de la consommation moyenne périodique, ce qui réduit le risque. Une fois de plus, le placement des buffers (3) joue un rôle ainsi que la fixation des Lead Time de planification (4).
- **(6) du facteur de variabilité** : d'après DDMRP, plus un article est variable plus il faut augmenter le facteur pour augmenter la taille du buffer. Cela étant, il conduit paradoxalement à un plus haut seuil de détection de pic, ce qui pourrait réduire leur détection.
- **(7) Du facteur de délai** : plus il est haut, plus le seuil de pic augmente. D'après les recommandations, le facteur est fonction inverse du délai, ce qui signifie que les articles à délais longs auront un seuil plus bas.

Il semble logique de vérifier que le choix de paramétrage ne fasse pas descendre le seuil de détection sous la demande moyenne.

Réflexions

À défaut de modèle robuste, il semble important de vérifier que le choix de paramétrage ne fasse pas descendre le seuil de détection sous la demande moyenne sous peine de détecter des pics très fréquemment et de déclencher et/ou majorer le phénomène du problème de la taille des ordres.

Phase P2-10 POC lien facteur de variabilité-zone rouge

Description-Analyse

La zone rouge est présentée comme la zone de sécurité qu'on doit pouvoir consommer en cas de besoin. Les recommandations sont d'augmenter la taille de la zone si la variabilité est forte pour s'en protéger en augmentant le **facteur de variabilité (6)**. En cas de faible variabilité, le coefficient est abaissé ce qui diminue le niveau total de la zone rouge, ce qui est l'objectif.

Cependant, dans la pratique, **l'abaissement de la zone rouge réduit mécaniquement le seuil de détection de pic** si l'on utilise la zone rouge comme base de calcul pour ce dernier. Rappelons que DDMRP préconise 3 méthodes de fixation du seuil de pic dont 2 directement liées à la zone rouge (50% de la zone rouge ou TOR) et une troisième basée sur la consommation périodique moyenne.

Par conséquent, les méthodes qui lient le seuil de pic et la zone rouge, génèrent plus de détection de pics alors même que la variabilité est moindre. On obtient donc davantage de détection de pics ce qui conduit à anticiper les ordres. La recommandation est donc d'augmenter le seuil de détection pour éviter d'introduire de la variabilité « calculée » par DDMRP. Plusieurs pistes sont envisageables : -

- soit pragmatiquement en utilisant un paramétrage en nombre de périodes,
- soit en proposant un paramétrage plus fin du seuil de pic qui contrerait l'effet pervers lié à l'abaissement du coefficient de variabilité. Des investigations plus précises sont nécessaires pour étudier cette possibilité.

Si l'on compare DDMRP à la quasi-totalité des autres PPC, il est le seul à proposer un **dimensionnement dynamique** des buffers sur l'horizon temporel de l'ordonnancement. Les différentes zones du buffer varient automatiquement, en fonction de l'évolution de la consommation réelle à court terme. Les autres PPC recommandent en général un réexamen périodique du dimensionnement sur l'horizon tactique (de l'ordre de plusieurs mois).

D4 Analyse des indicateurs

Synthèse

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée (Phase0)		Performance in vivo (Phase1)		Performance in vitro (Phase2)
		Médiane	MAX	Médiane	MAX	
Performance client	(1) OTD	+17%	+45%	+15 pts (P1-2)	+50pts (P1-2)	+5pts (P2-1) -16 à -50 points (P2-2) 100% (P2-5, P2-6 et P2-7) sous condition de lots de transfert et de visibilité suffisante
	(2) Profondeur du retard	NC	NC	Des cas de réduction non quantifiée (P2-5-A)		
Performance du système industriel	(3) Taux de charge :	NC	NC	Libération de capacité (P1-4)		
	(4) Lead time	-60%	-85%	-50pts (P1-2)	-85pts (P1-2)	En augmentation à cause de la taille des ordres (P2-2, P2-3)
Performance financière	(5) stock total	-26%	-54%	-28 pts (P1-2)	-60pts (P1-2)	En augmentation (P2-1-A, P2-2C)
	(6) Pourcentage des encours	NC	NC	Des cas de réduction des encours évoqué (P2-5-A)		En augmentation P2-2

Itérations

Phase P0-1 Appropriation des concepts

Description-Analyse

Le Demand Drivent Institute communique officiellement sur son site internet sur 3 aspects de la performance : la performance client mesurée avec l'OTD (1), la performance industrielle avec le Lead Time et la performance financière mesurée par le niveau de stock (2). Les chiffres présentés sont ceux de l'industrie manufacturière compte tenu de notre sujet d'étude à savoir les PPC.

Les améliorations sont particulièrement spectaculaires concernant la réduction des lead Times.

Réflexions

La question du biais de communication se pose nécessairement lorsque l'on utilise les données d'un site commercial. Les chiffres annoncés sont issus d'une étude menée par un Cabinet conseil sur 68 entreprises mais aucune précision n'est donnée sur la technique d'échantillonnage : s'agit-il de clients ? d'entreprises représentatives ? Il est fondamental de pouvoir recouper ces informations avec des expériences réelles pour confirmer ces excellents résultats.

Interfaces :

P0-P1/D4

Les performances annoncées sont-elles confirmées par des expériences industrielles ?

Phase P2-1 POC impact financier DDMRP

Description-Analyse

Les résultats de ce plan d'expérience ont montré :

- Sans aucune variabilité DDMRP conduit à un **stock (6)** quasiment **7 fois plus élevé** pour un OTD à 100%
- Avec une variabilité de 10% de la demande :
 - o DDMRP standard a un **(1) OTD meilleur** que toutes les versions de MRP2, soit 98,2% contre 93% pour MRP2.
 - o Par contre le niveau de stock est 8% plus élevé que la pire solution du MRP2.

Réflexions

Dans le contexte étudié, la performance client de DDMRP standard semble meilleure que celle de MRP2 mais au prix d'un niveau de stock plus élevé. Les tentatives de manipulation arbitraire des paramètres facteur de variabilité (6) et de délai (7) montrent cependant qu'il est possible d'améliorer la performance financière. Ce résultat montre un lien entre ces 2 paramètres et le niveau de performance qu'il faudra préciser.

Interfaces

P2-P1/D4

L'amélioration de l'OTD se fait-elle toujours au prix d'une augmentation du niveau de stocks ?

Phase P1-2 Étude de cas documentaires

Description-Analyse

L'analyse des cas documentaires confirme les performances annoncées sur les 3 axes de la performance : client, industrielle et financière. Cependant, sur les cas étudiés, aucun des cas étudiés ne fait état d'une amélioration conjointe des 3 axes.

Réflexion

Le fait que les améliorations ne soient pas conjointes pose question. Cela pourrait indiquer qu'il y a un choix à faire i.e. un axe à privilégier au détriment des autres. L'hypothèse pourrait également être qu'un autre phénomène est en cause tel qu'une question de maturité pour arriver à la maîtrise de DDMRP.

Interfaces

P1-P2

La performance conjointe sur les 3 axes de la performance est assez peu commune. Est-ce que ce phénomène est observable par simulation ce qui confirmerait qu'il y a un choix à faire ?

Phase P2-2 Études de cas industriels

Description-Analyse

Les données sont confidentielles, cependant les paramètres utilisés dans les différents plans d'expérience ainsi que les résultats base 100 situation réelle de l'entreprises sont présentés dans les documents de travail.

Pour rappel, la simulation à évènements discrets évalue la « performance autonome » des PPC c'est-à-dire en dehors des conséquences des prises de décision humaines.

Entreprise 1

Scenario	Indicateurs	OTD en %	Stock base 100 réel
Glissement de la demande mais total égal	MRP2 stock de sécurité taux de service à 99%	100	+13%
	DDMRP	97.2	+31%
Fortement variable	MRP2 stock de sécurité taux de service à 99%	100	-14%
	DDMRP	74	+31%

Entreprise 2

Scenario	Indicateurs	OTD	Stock base 100 réel
Demande +/-10%	MRP 2 semaines SS	100	+18%
	DDMRP 1 buffer	97.4	+146%
Fortement variable +/-30% +15% de volume	MRP 2 semaines SS	98.7	+20%
	DDMRP 1 buffer sur PF	43.2%	+173%

Pour les 2 entreprises, les simulations ne sont pas concluantes ni comparativement à leurs situations actuelles ni par rapport à MRP2 simulé.

- En contexte moyenne variable, l'OTD est proche de 100% mais le stock est plus important que le stock réel.
- En contexte fortement variable, l'OTD obtenu avec DDMRP se dégrade pour les 2 entreprises.

Réflexions

Les 2 entreprises sont très matures sur la gestion des flux ce qui explique les excellentes performances actuelles. Inversement, elles n'avaient aucun recul sur les paramètres utilisés pour DDMRP et donc les paramètres par défaut ont été utilisés.

Par ailleurs, les 2 font face à des délais de fabrication et d'approvisionnement très longs ce qui majore les DLT et le problème des tailles de lot. Les systèmes industriels ne pouvaient pas absorber la charge générée par DDMRP.

Cette étude préliminaire nécessiterait un approfondissement.

Interfaces

P2-P2

Les performances simulées sont médiocres comparativement à la situation actuelle des entreprises. Le paramétrage peut-il être en cause?

P2-P1

L'augmentation des stocks comparativement à MRP2 est-elle retrouvée chez les entreprises utilisatrices?

Phase P1-3 Entretiens semi-directifs

Description-Analyse

Lors de nos échanges avec les experts, nous avons pu identifier un amalgame entre 2 définitions du Lead Time, à savoir le temps de réponse au client et le temps de traversée c'est-à-dire le temps écoulé entre le lancement d'un Ordre et la mise à disposition de la référence. Dans le 1^{er} cas, le placement du buffer peut effectivement avoir un impact majeur puisqu'il peut permettre de servir le client sur stock ou de commencer la finition du produit à partir d'un buffer de produits semi-finis qu'à réception de la commande ferme. La compression du Lead Time est immédiate dans ce cas mais conditionnée au placement du buffer. Quant au temps de traversée, qui est le temps écoulé entre le lancement de l'ordre de fabrication et la mise à disposition du produit fini (en stock ou au client), il pourrait être pénalisé par la mise en place de buffers intermédiaires qui augmente le temps de séjour dans l'atelier.

Réflexions

Phase P1-4 Visites sur Site

Description-Analyse

2 entreprises nous ont rapporté une baisse réelle des **temps de traversée** due à la libération de capacité productive permise par la méthode DDMRP. Pour elles, en s'affranchissant des tailles de lots non nécessaires, elles ne lancent que les quantités strictement nécessaires pour servir les commandes client. De ce fait, elles ont réussi à réduire les en-cours et donc à améliorer les temps de traversée.

Réflexions

Phase P1-5 Survey 88 études de cas

Description-Analyse

La base de données des cas d'entreprises ayant réellement implanté DDMRP a été constituée grâce à l'ensemble des sources présentées dans le Cadre Méthodologique. Au total, ce sont 88 cas qui ont été étudiés.

La vérification exhaustive de ces indicateurs sur l'échantillon de 88 cas n'est pas réalisable, car 22 cas sont présentés sans aucune information concernant les indicateurs étudiés et toutes les informations ne sont pas disponibles pour tous les cas pour tous les indicateurs (seulement 19 résultats chiffrés pour OTD, + 10 qui font état d'amélioration sans précision, 44 résultats pour les stocks et 21 pour le Lead Time).

Sur les données disponibles, les chiffres présentés sont très proches de ceux présentés par le DDI et corroborent les performances annoncées. Cependant, le peu de résultats présentés relativisent cette performance.

On constate que **seules 6 entreprises annoncent l'amélioration conjointe des 3 indicateurs**. Pour toutes ces entreprises, les 3 indicateurs atteignent de hauts niveaux de performance.

Réflexions

L'absence d'amélioration conjointe sur les 3 axes de la performance pose question. Il se pourrait que certains choix de paramétrage et/ou de placement des buffers faits dans les projets DDMRP poussent à privilégier un indicateur plutôt que les autres (notion de Trade off) ou encore qu'il faut atteindre un certain niveau de maturité dans le projet DDMRP pour atteindre cette triple performance.

D5 Analyse bénéfiques/risques

1 Synthèse

		Bénéfices/avantages	Inconvénients/Risque
Décision : choix du PPC	Interne	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité des POC (P1-3/A, P1-4/C) • Décision poussée par la volonté d'améliorer les stocks (P1-4/A, P1-5/C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Philosophie très éloignée de la vision coût très largement ancrée (P1-4/A) • Manque de maturité sur les aspects SCM et performance industrielle (P1-3A)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreux exemples français de réussite de projets DDMRP (P1-3A) • Assurer un meilleur taux de service au client (P1-4/A, P1-5/C) • Saisir de nouvelle opportunité de marché (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect trop marketing de la méthode (P1-4/A) • Les anglicismes sont parfois vus comme rédhibitoires (P1-4/A)
Phase d'implantation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité des concepts permettant une compréhension des utilisateurs (P1-3/A, P1-4/C) • Rapidité des résultats (P1-3/A, P1-4/C) • Rapidité de mise en œuvre (P1-3/A, P1-4/C) • Possibilité de former en interne (P1-3/A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) • Non-implication de la direction générale (P1-3/A, P1-4/C) • Difficulté des paramétrages (P1-4/A) • Risque d'augmentation des stocks au lancement de DDMRP (P2-1/A, P2-2/C, P1-3/C, P1-4/C) • Départ du leader (P0-1/A, P1-3/C) • Taille du projet initial (P1-4/A) • Absorption par une autre entreprise ne partageant pas la vision flux (P1-4/C)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> • Des cabinets français en pointe (P1-3/A, P1-4/C) • Une communauté active qui partage les expériences (P1-4/A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance au cabinet-conseil (P1-3/A, P1-4/C)
Phase d'utilisation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de la gestion des priorités (P0-1/A, P1-3/C, P1-4/C) • Amélioration considérable et unanime du travail des planificateurs notamment par le côté visuel de la méthode et la gestion des priorités (P1-3/A, P1-4/C) • Amélioration de la performance client (P0-1/A, P2-1/C, P1-3/C, P1-5/C) • Plus de résilience en cas de problème (P1-3/A, P1-4/C) • Amélioration de la qualité des stocks (P1-3/A, P1-4/C, P1-5/C) 	<ul style="list-style-type: none"> • Outils dépendants de l'ERP entretiennent la résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) • Augmentation possible des stocks à terme (P2-1/A, P1-3/C, P1-4/D, P1-5/C) • Besoin de polyvalence (cf. buffer de compétences) (P1-4A) • Absence d'outil de gestion de la capacité (P1-4/A) • Nécessité de modifier les indicateurs (P1-3/A) • Obligation de former / coût de la formation
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du temps de réponse au client (P1-4/A) • Opportunité de marché par meilleure disponibilité (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> • Non-implication des clients qui ne souhaitent pas partager le coût des buffers (P1-4/A) • Indiscipline des clients qui transmettent des ordres erratiques perturbant le système (P1-4/A)

2 Itérations

Phase P0-1 Appropriation des concepts

VI-5.5 Description-Analyse

L'analyse des ouvrages de référence n'apporte pas d'éléments concrets concernant les avantages et les inconvénients qualitatifs de DDMRP. L'argumentaire est plutôt centré sur les aspects quantitatifs de la performance. La seule réelle exception est la mise en avant de la gestion des priorités.

Plus récemment (Ptak, 2018) ont fait état de cause d'échec du déploiement vers le modèle Demand Driven Adaptive Enterprise (DDAE), à savoir : la perte du leader, le rachat par une autre entreprise ne partageant pas le vision flux.

Réflexions

L'absence de remarques qualitatives dans l'analyse des ouvrages de références n'est pas très étonnante. Beaucoup de PPC sont présentés du point de vue méthodologique et du point de vue des apports en termes de performance quantitative mais n'évoquent ni les avantages en termes qualitatifs ni les limites du PPC.

Interfaces :

P0-P1/D5

Au-delà des indicateurs de performances, l'utilisation de DDMRP présente-t-elle des avantages et des inconvénients ? Existe-t-il d'autres cas d'échecs que ceux brièvement évoqué par les auteurs ?

Phase P0-2 État de l'art

Description-Analyse

Les publications ne remontent que très peu d'informations concernant les aspects qualitatifs de la performance. (Dessevre et al., 2020b) réalise un retour d'expérience qualitatif sur un cas d'implantation réel ayant soulevé des questionnements. Ils répertorient ainsi les challenges pour chaque fonction logistique (approvisionnement, production et distribution) à relever dans le cadre d'un projet DDMRP. Ce travail d'objectivation a été également retrouvé chez (Butturi et al., 2021) dont la revue de littérature critique relève 6 inconvénients de DDMRP (la MOQ impactant la taille des ordres, la subjectivité dans la fixation des paramètres, la nécessité de formation importante, la non applicabilité à des articles à délais importants, la dégradation du taux de service).

Réflexions

Le peu de retour qualitatifs sur l'utilisation de DDMRP est lié à la nature même des publications qui se sont davantage penchées sur les aspects quantitatifs de la performance. Le peu de retour disponible fait plutôt état de contraintes que d'avantages qualitatifs, ce qui pose la question des retours d'expériences utilisateurs.

Interfaces

P0-P1/D5

Très peu d'informations qualitatives ont été retrouvées. Les quelques inconvénients relevés sont-ils généralisables ? Existe-t-il des avantages en termes qualitatifs qui justifieraient le recours à DDMRP en dehors de sa performance quantitative annoncée ?

Phase P1-3 Entretiens semi-directifs

Description-Analyse

Les entretiens avec les experts ont fait émerger plusieurs points positifs concernant DDMRP. Les experts consultés étaient, soit des consultants ayant accompagné plusieurs projets, soit des experts d'entreprise qui participent au déploiement de DDMRP dans leur entreprise.

Parmi les avantages de DDMRP, le principal atout est la facilité de déploiement d'un POC sur un périmètre limité permettant de convaincre rapidement. Le fait que les cabinets de consultants français soient en pointe au sujet de DDMRP permet d'avoir de nombreux exemples à benchmarker. Cependant, certains experts recommandent un niveau de maturité industrielle suffisant pour appréhender DDMRP et considèrent qu'il s'agit d'un risque à terme car les personnes impliquées dans la mise en œuvre et l'exploitation pourraient ne pas comprendre l'impact des décisions. Pour d'autres au contraire, le fait de ne pas avoir de recul permet d'éviter de se poser des questions qui n'ont plus lieu d'être dans DDMRP (exemple : fiabilité des prévisions).

Au niveau de la phase d'implantation, la **simplicité des concepts** sous-jacents, la **possibilité de former en interne** et la **rapidité des résultats** leurs apparaissent comme de réels avantages. Les cabinets de consulting français sont d'une aide précieuse de par leur expertise. Côté **Risques**, plusieurs points ont été identifiés par les experts. Naturellement, la **résistance au changement** est le point le plus délicat. Il est encore plus important avec DDMRP car la **philosophie DDMRP est très éloignée** des pratiques habituelles des entreprises. Les experts notent également le **manque d'implication de la direction générale**. Dans de nombreux cas, le pilote est lancé par les directions opérationnelles (logistique et/ou production) qui demandent ensuite à étendre la démarche. Cependant, les changements impliqués par DDMRP nécessitent un réel soutien de la direction générale puisqu'il remet en cause fondamentalement la vision de la performance. Sans alignement avec la stratégie de l'entreprise, l'extension est compromise. Cet alignement nécessite un changement d'indicateurs qui permette aux planificateurs d'évaluer le bénéfice de DDMRP. Le **départ du leader** qui est évoqué par Ptak et Smith (2018), est un risque confirmé par les experts. Toujours lors de la phase de lancement, **le stock peut temporairement augmenter**. Ce phénomène identifié par les simulations, a été confirmé par les experts. D'après eux, lors du lancement de DDMRP, il faut d'une part constituer les buffers et d'autre part consommer les stocks excédentaires. Ce phénomène n'est pas systématique et dépend de la répartition initiale des stocks. Enfin, lors de la phase d'implantation, des experts entreprises ont fait part de leur **dépendance aux cabinets-conseil qui délivrent les formations et les certifications**. Ce type de constat n'est pas propre à DDMRP puisqu'un certain nombre de méthodes et outils de gestion industrielle fonctionnent sur le même principe (Lean six sigma avec les certifications « Belt », ou encore la méthode QRM qui ne certifie qu'un petit nombre de cabinets entretenant ainsi la dépendance).

En phase d'utilisation, les experts confirment une amélioration sans conteste de la gestion des priorités. Le fait de disposer d'un indicateur objectif permet de rasséréner les échanges et de réaliser les arbitrages beaucoup plus rapidement. Ils soulignent également une **amélioration du travail des planificateurs**. Ils attribuent l'amélioration à l'indicateur de priorité, au côté visuel de la méthode qui permet de se concentrer sur les points essentiels et sur la nature certaine des ordres déclenchés. Avec DDMRP, les ordres étant déclenchés suite à une consommation réelle, les planificateurs ne passent plus des heures à comprendre les recommandations du système comme c'est le cas avec MRP2. Pour l'ensemble des experts consultés, la performance **client** s'est améliorée ce qui permet des **relations plus sereines**. Les experts reconnaissent que DDMRP ne fait pas disparaître les problèmes mais soulignent une bien meilleure **résilience** que dans les systèmes traditionnels. Ils attribuent cette performance **au côté très visuel** de DDMRP qui permet d'identifier très facilement et rapidement les problèmes.

Les inconvénients identifiés sont peu nombreux : la dépendance des outils DDMRP à l'ERP entretient la résistance au changement et une augmentation possible des stocks à terme. De ce fait, les

consultants nous expliquent avoir changé leurs arguments en ne promettant plus une réduction des stocks mais une amélioration globale de leur qualité.

Réflexions

Les échanges ont été très fructueux mais identifient plus d'avantages que d'inconvénients. Le profil des experts consultés les rend forcément très favorables à DDMRP puisqu'ils en sont les promoteurs. Le retour des utilisateurs paraît indispensable pour confirmer les éléments.

Phase P1-4 Visites sur Site

Description-Analyse

Les 4 visites sur site utilisant DDMRP sont l'occasion d'échanger avec différents profils de personnes impliquées dans la démarche DDMRP : chargés de projets, planificateurs et ouvriers.

Concernant la phase de décision, les entreprises sont principalement poussées par le souhait d'améliorer le niveau de stock et le service client. Les réticences internes auxquelles elles ont fait face sont de 3 natures :

- La philosophie DDMRP étant très éloignée des messages habituels il est parfois difficile de faire comprendre l'intérêt de ce PPC. C'est particulièrement le cas avec la notion de coût unitaire et de la taille de lot économique. Le fait de revenir sur ce principe est parfois insurmontable pour certains décideurs.
- L'aspect trop marketing est parfois contreproductif : certains ne voient dans DDMRP qu'un « recyclage sans intérêt » de techniques déjà connues dont le but est de vendre des livres, des formations et du consulting. Certains n'y voient qu'un effet de mode. Il est parfois difficile de convaincre en interne de la réelle plus-value.
- Les anglicismes sont rédhibitoires dans certaines entreprises. Ce type de remarques émane davantage de petites entreprises.

En phase d'implantation, les points soulevés par les experts sont corroborés. Mais les personnes consultées nous ont également fait part d'autres éléments. Le plus marquant est sans doute lié à la **difficulté de paramétrage de DDMRP**. Certains responsables nous ont fait part de leur difficulté à comprendre le rôle de chaque paramètre. Dès lors, ils appliquent les recommandations de DDMRP et ne jouent que sur les paramètres de délai et de variabilité. Une entreprise a également partagé son expérience malheureuse d'un **projet pilote trop ambitieux** qui n'a pas permis d'atteindre les performances attendues. Cependant, convaincue par DDMRP, un projet de plus petite ampleur a été relancé avec succès permettant ensuite d'étendre le périmètre.

En phase d'utilisation, l'avis est unanime sur le **manque d'outil de gestion de la capacité**. Des solutions sont déployées en interne mais la couche DDMRP de DDAE ne permet pas d'assurer des ordres réalisables. **La polyvalence** est considérée comme indispensable par l'une des entreprises qui s'assure ainsi de la réalisation des ordres dans les délais souhaités. Elle n'est cependant pas toujours possible. La dépendance à l'ERP entretient les réflexes de certains planificateurs qui ont d'autant plus de mal à prendre les bonnes décisions. Du point de vue externe, les clients sont mis en cause par 2 entreprises qui relèvent que les ordres erratiques envoyés perturbent DDMRP. Enfin l'une d'elles, fait part de la **non implication du client** qui refuse de partager le coût du buffer de produits finis. Dans ce contexte, elle ne peut financièrement pas assumer la mise en place de buffer supplémentaire.

Réflexions

Interfaces

P1-P2/D2 :

Quels sont les paramètres qui influencent la performance et auxquelles les entreprises doivent particulièrement être attentives ?

D6 Conclusion et Recommandations

Septembre 2022

Présentation générale DDMRP

Face à l'environnement VUCA, Ptak et Smith, praticiens de la gestion industrielle, constatent dans les années 2000 une efficacité partielle des systèmes de pilotage traditionnels face aux nouveaux enjeux économiques. Pour eux, tenter d'améliorer les méthodes existantes ne suffira pas à s'adapter aux exigences de ce nouveau contexte et à répondre aux nouveaux critères de performance.

Ils développent et proposent donc une nouvelle approche, dite Demand Driven MRP (DDMRP) (Ptak and Smith, 2011). Leur objectif est de s'accorder de la variabilité inhérente au contexte économique plutôt que de lutter contre elle. Ils argumentent que la demande est devenue tellement imprévisible qu'il vaut mieux éviter d'assoir le processus de planification sur des prévisions qui se révéleront forcément fausses. Leur approche est donc focalisée sur la demande réelle d'où son appellation « Demand Driven » traduisible par « pilotée par la demande ».

D'après les auteurs, « il s'agit d'une méthode formelle de planification multi échelons et une méthode d'exécution qui protège et promeut le flux d'information pertinente grâce à l'établissement et au management de stocks de découplage placés stratégiquement ». Il s'agit clairement d'une **méthode couplant la planification et le suivi d'atelier**. La base de leur réflexion est l'utilisation de **points de découplage** qui doivent permettre d'éviter la propagation de la variabilité au sein du flux. Selon la définition de l'APICS, un point de découplage est un emplacement dans la nomenclature ou un réseau de distribution où l'on place un stock afin de créer une indépendance entre les processus ou entités.

Sur la philosophie sous-jacente, les auteurs s'appuient sur les théories TOC, Lean, et MRP2. La Caractérisation valide ces aspects puisqu'on retrouve des concepts empruntés aux trois théories :

- La vision flux issue de la TOC avec pour objectif de maximiser les ventes.
- Le Lean pour ses emprunts au Kanban avec les couleurs des buffers et le mode de déclenchement à seuil (bien que Kanban ne soit pas le PPC à l'utiliser).
- MRP2 pour le calcul des besoins dépendants des articles bufferisés.

Les résultats annoncés sont prometteurs sur les 3 axes de la performance :

- Client : amélioration de l'OTD
- Financière : réduction des stocks
- Industrielle : réduction des Lead Times.

D1 Périmètre fonctionnel

Niveau de décision	Processus	MRP2	Kanban	Conwip	DBR	POLCA	DDMRP	Sources
Stratégique	(1) Détermination d'un plan de production global = charge globale							
	(2) Détermination des ressources globales = capacité globale							
Tactique	(3) Détermination des besoins détaillés par référence							
	(4) Détermination détaillée de la capacité				goulet			
Opérationnel	(5) Lancement des ordres de fabrication et d'approvisionnement							P0-1-A P1-2-C
	(6) Ordonnancement,				goulet			P0-A P1-2-C
	(7) Séquencement				goulet			
	(8) Suivi des ordres							P0-A P1-2-C
	(9) Suivi des ressources productives				goulet			

À retenir :

DDMRP est un PPC centré sur la phase opérationnelle. À lui seul, il ne couvre pas le champ complet des PPC. L'utilisation des autres phases de la méthode Demand Driven Adaptive Enterprise semble apporter des réponses.

D2 Grille d'analyse des caractéristiques

	Catégories	Caractéristiques	Valeurs	source
D2-Caractéristiques du PPC	Caractéristiques générales /philosophie	(1) Objectif	Amélioration de la qualité du stock et du taux de service , maîtrise des flux	P0-1-D, P1-A
		(2) Intégration de la Variabilité	Intégrée dans le PPC par l'intégration de points de découplage censés briser l'effet coup de fouet	P0-1-A
	Génération des ordres	(3) Rôle des prévisions	Aucun	P0-1-A, P1-C
		(4) Capacité	Finie	PD-1-D, P1-A, P2-C
		(5) Niveau de prise de décisions	Centralisé	P0-1-A
		(6) Contrôle du flux dans le planning	Time Phased	P0-1-A
		(7) Modèle de gestion de stock	Continu/quantité variable	P0-1-A
	Atelier	(8) Contrôle d'atelier	Pull	P0-1-A
		(9) Système à cartes	Non	
		(10) Système de contrôle	Priorité en fonction de la position de la NFE dans le buffer de stock	P0-1-A
D2-Contexte industriel	Profil des entreprises	(11) Taille de l'entreprise	Sans influence	P0-1-A, P1-1-C
		(12) Secteur d'activité	Sans influence	P0-1-A, P1-1-C
	Process	(13) Mode de réponse à la demande	Dépend du placement des buffers, compatible MTS, MTO et ATO Pas pour les systèmes ETO	P0-1-A, P1-1-C
		(14) Mode de production	Discret ou continu	P0-1-A, P1-1-C
		(15) Organisation d'atelier	Sans importance lié au placement de buffer	P0-1-A, P1-1-C
		(16) Existence de goulot	Oui, mais intégré dans DDOM	P0-1-A, P1-1-C
	Complexité produits	(17) Hauteur	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-6-A
		(18) Largeur	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-6-A
		(19) Densité	Sans incidence tant que $DLT > horizon$ visibilité	P2-6-A
		(20) Nombre de produits	1 seul ► Multiproduit	Non testé
	Demande	(21) Profil de la demande	Stable, Saisonnière, Ramp-up Très adapté à la demande stable et au ramp-up Performance moins bonne sur le profil saisonnier (stock plus élevé et OTD en baisse)	P2-7-A
		(22) Variabilité de la demande	Faible ► Forte	P2-7-A
		(23) Horizon de Visibilité	Impact négatif très important si horizon $< DLT$	P2-7-A
		(24) Volume de la demande	Peu d'impact	P2-7-A
	Limitations	(25) Environnement Rate Based auxquels DDMRP n'apporte pas de plus-value		P2-2-A (étude de cas in vivo)

A RETENIR

DDMRP est un PPC centralisé, à seuil et à quantité variable qui sert la demande sur stock comme Kanban par exemple (demand pull).

	Date Fixe	Inventaire permanent ou à seuil
Quantité Fixe	Gestion calendaire	Point de commande (Kanban)
Quantité variable	Recomplètement périodique	DDMRP

Les études ont mis en évidence **deux contradictions majeures** entre la définition des Caractéristiques de DDMRP et la réalité industrielle :

- **Objectifs** de DDMRP : Il est annoncé comme un système visant la maîtrise des stocks. L'Étude quantitative a mis en évidence un phénomène **d'accroissement temporaire des stocks** confirmé par les experts lors des entretiens. Ce phénomène est dû à la constitution des buffers et à la nature des stocks initiaux. Une entreprise possédant un stock dormant important aura du mal à le résorber. Ils nous ont également fait part de **certains cas dans lesquels aucune baisse de la quantité** en stock n'était pas visible, même à terme. Par contre, **la répartition des stocks est toujours plus efficace**, les stocks possédés étant justifiés.
- **Capacité finie** : Il est apparu clairement, que dans le cas de l'utilisation de DDMRP seul, le fait de fixer un maximum de stock par référence (le top du vert) ne permet pas d'assurer une charge réalisable par le système de production, notamment dans le cas des jobshop. D'une part, l'utilisation des formules de base de dimensionnement des buffers n'assure pas que le plafond calculé respecte la capacité du système. D'autre part, les ordres générés pour toutes les références ne garantissent pas la faisabilité de la charge totale. **Dès lors, DDMRP seul apparait davantage comme un PPC à capacité infinie.** La mise en place de DDMRP semble modérer ces effets d'après les retours d'expérience en permettant la gestion de la capacité. Les entreprises qui utilisent DDMRP mettent en place des **mesures pour limiter ces effets**. Certaines **limitent directement la quantité lancée** en s'affranchissant de la règle de calcul qui veut que la quantité commandée corresponde à la différence entre le top du vert et la position de la NFE. D'autres passent des **contrats hebdomadaires** pour limiter la quantité d'ordres dans l'atelier. Nous avons expérimenté avec succès **les lots de transferts** dans le modèle de simulation mais cette mesure n'est pas toujours applicable en pratique.

Concernant le **contexte industriel** dans lequel DDMRP serait pertinent, il apparait que :

- Le profil de l'entreprise est peu important.
 - o **La taille**, les seules entreprises **non représentées sont les TPE**. Cependant ce n'est pas un constat propre à DDMRP, les TPE manquant souvent de moyens humains, techniques et financiers pour déployer des méthodes de gestion.
 - o **Secteur d'activité** : là encore pas de franche discrimination, les exemples sont nombreux dans tous les secteurs.
 - o **Mode de réponse à la demande** : on trouve quasiment pour chaque mode **sauf pour l'ETO**. **Le placement des buffers** permettrait de s'adapter à tous les modes sans difficulté.
- **Les process productifs** ne sont pas un élément discriminant car on retrouve tous types de mode de production et d'organisation d'atelier parmi les entreprises utilisatrices. L'existence de goulot est directement intégrée dans DDMRP. La seule exception concerne les entreprises fonctionnant avec un planning basé sur un taux périodique (**Rate Based**). L'intérêt de basculer sur un système à seuil peut être discuté puisqu'il génère des ordres moins fréquents et plus importants à l'opposé de la logique souhaitée.

D'après les experts, ce sont les caractéristiques des produits et de la demande qui justifient le recours à DDMRP. Au point actuel de l'étude, on constate :

- **L'impact majeur de la visibilité** de la demande : Le plan d'expérience P2-7 a montré qu'une visibilité réduite en deçà du DLT conduit à un effondrement de l'OTD quels que soient les autres paramètres (profil, volume et variabilité). La pertinence de DDMP dans le cas où le DLT est supérieur à la visibilité de la demande n'est pas certaine.
- **Peu d'impact** des facteurs liés à la demande (**variabilité, volume**) tels que testés mais la question des très faibles volumes reste posée.
- **Le profil saisonnier** de la demande donne des **résultats inférieurs** aux profils stable et ram-up quels que soient les autres facteurs testés (variabilité client, volume) malgré l'utilisation des facteurs d'ajustement planifiés.
- **La complexité est problématique avec des horizons de visibilité réduits** : la densité de la nomenclature est un facteur aggravant (jusqu'à -38pts d'OTD et stock x3.5). La largeur est moins pénalisante. Avec une visibilité ≥ 1 , ces deux facteurs sont sans impact.

Parmi les caractéristiques de la demande et des produits, **la visibilité de la demande** qui a été évaluée grâce à des modalités basées sur le DLT semble jouer un rôle fondamental. Ce phénomène pourrait expliquer pourquoi un certain nombre d'experts mettent en doute l'intérêt de DDMP pour les articles à délais longs. Ces derniers peuvent conduire à des DLT supérieurs à la visibilité. Des investigations supplémentaires doivent être menées pour affiner cette conclusion. La question des volumes production très faibles mais récurrents reste ouverte.

D3 Synthèse des éléments constitutifs

- Nature Utilisation	Imposé	Déterminé	
		Paramètre (obligatoire ou optionnel)	« critère de choix »
Paramétrage	(1) Consommation moyenne (CMJ) (P0-1-A) (2) Nomenclature (P0-1-A)	(3) Placement des buffers (4) LT (5) DLT (6) Facteur de variabilité (7) Facteur de délai (8) Taille de lot (9) Cycle de commande (10) Horizon de calcul de la CMJ (11) Seuil de pic (12) Horizon de pic	Heuristiques (P0-1-A, P0-2-C, P1-3-C), DLT (P2-5-A) Fiabilité des délais (P2-2A) Lié aux placement des buffers (P0-1-A, P1-3-A, P2-5-A) Variabilité demande (P0-1-A, P2-12-C) Longueur des délais (P0-1-A) Temps et cout de réglage ou contrainte technique P0-1-A Fréquence souhaitée (P0-1A) 3 grands options (P0-1-A) 3 options (P0-1-A, P2-9-C) Minimum DLT de la référence (P0-1-A)
Décision	(13) NFE = Stock physique + réapprovisionnement en cours – besoins qualifiés Besoins qualifiés = retard + ordre du jour + pics qualifiés Pics qualifiés = sur un horizon défini (celui de prise en compte des ordres réels) quantité totale d'une journée qui dépasse le seuil de détection de pic (en général = 50% zone rouge) TOG et TOY (P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	L'ensemble des éléments utilisés dans le calcul sont définis lors de la Phase de paramétrage, la décision repose donc sur le paramétrage(P0-1-A, P1-3-A, P1-4-A)	

À RETENIR

Globalement l'étude montre que les experts et les utilisateurs suivent les recommandations concernant le paramétrage. Les différentes expérimentations ont fait remonter plusieurs comportements inattendus de DDMRP qui conduisent à intégrer de nouveaux éléments dans les choix de paramétrage.

- **Placement des buffers** : différents plans d'expérience nous ont montré l'importance du placement en fonction du DLT (P2-2 Étude de cas Industriels, P2-5 Placement des buffers). Ce choix induit directement le DLT qui est ensuite utilisé à tous les niveaux de dimensionnement et impact directement la taille du buffer, parfois plus que les facteurs de délai et de variabilité. Il semble nécessaire d'intégrer le DLT en plus des heuristiques proposées dans la réflexion du placement des buffers.
- **Le DLT** : il semble jouer un rôle majeur dans la performance. Les résultats de P2-7 Profil de la demande ont montré que $DLT < \text{horizon de visibilité de la demande}$ engendre des contreperformances notoires en terme d'OTD. Cela pourrait expliquer que certains experts déconseillent DDMRP pour les délais long. Des tests complémentaires doivent être menées pour confirmer le phénomène avec des LT plus importants que ceux utilisés

dans ce PE. Toutefois, il paraît intéressant de placer des buffers de façon à ce que $DLT < horizon$.

- **Le seuil de pic** : 3 options sont proposées sans vraiment guider le choix. Les expérimentations menées dans le cadre de P2-9 Seuil de Pic montrent qu'il est important que **le seuil ne soit pas inférieur ou trop proche de la consommation moyenne** sous peine de détecter des pics à chaque période et de créer un stock d'anticipation. Or dans les cas de DLT faibles, le seuil s'approche plus facilement de la consommation moyenne. Une attention particulière doit donc être portée, dans ce cas de DLT faible, au coefficient de variabilité et de délai qui le font directement varier ou bien utiliser un seuil de pic basé sur consommation moyenne * délai pour éviter leur influence.
- **Coefficient de variabilité** : Il est utilisé pour déterminer la zone rouge qui correspond au stock de sécurité. Les expérimentations menées dans le cadre de P2-10 lien facteur de variabilité/seuil de pic, nous ont montré que dans les cas de faible variabilité, en réduisant le facteur, on diminue mécaniquement la zone rouge et donc le seuil de détection des pics si on opte pour l'une des 2 options (0,5 TOR par défaut, ou TOR). Dans les cas où le DLT est faible, cette diminution conduit encore une fois à un stock d'anticipation et à davantage de détection de pics, ce qui est à l'opposé de la logique. Dès lors, il apparaît important, dans le cas de faible variabilité, de choisir l'option basée sur la consommation moyenne et un facteur de temps. La recommandation est la même que précédemment. Une nouvelle option qui considère $ADU * (1 + \text{écart-type de la demande})$ pourrait être testée.
- **Décision** : la **taille des ordres générés par DDMRP est plus importante** que celle générée par un MRP2 classique ou un système Kanban à une taille d'ordre fixe. Le problème est que cette taille d'ordre des buffers n'est pas forcément compatible avec la capacité et se répercute sur les articles dépendants. Ce phénomène est pénalisant notamment dans le cas des productions « rate based » pour lesquels les ordres générés représentent parfois plusieurs périodes de consommation moyenne. P2-4 Taille de lot montre des ordres dont la quantité est 6 fois supérieure à la demande. 2 phénomènes sont en cause :
 - o La zone verte est déterminée parmi le maximum de 3 options. Parmi ces options, aucune ne garantit que la taille des ordres correspondra à la consommation périodique. Elle est notamment majorée dans le cas des **DLT longs** et par le choix du **facteur de délai**.
 - o Le franchissement du seuil de réapprovisionnement n'est pas régulier et conduit donc à des ordres dont la taille peut varier fortement.

D4 Analyse des indicateurs

Axe de la performance	Indicateur	Performance annoncée (Phase0)		Performance industrielle (Phase1)		Performance simulée (Phase2)
		Médiane	MAX	Médiane	MAX	
Performance client	(1) OTD	+17%	+45%	+15 pts (P1-2)	+50pts (P1-2)	+5pts (P2-1) -16 à -50 points (P2-2) 100% (P2-5, P2-6 et P2-7) sous condition de lot de transfert et de visibilité suffisante
	(2) Profondeur du retard	NC	NC			
Performance du système industriel	(3) Taux de charge :	NC	NC			En augmentation problématique
	(4) Lead time	-60%	-85%	-50pts (P1-2)	-85pts (P1-2)	En augmentation à cause de la taille des ordres (P2-2, P2-3)
Performance financière	(5) stock total	-26%	-54%	-28 pts (P1-2)	-60pts (P1-2)	En augmentation P2-1-A, P2-2C
	(6) Pourcentage des encours	NC	NC			En augmentation P2-2

À RETENIR

L'étude des différents indicateurs donne des résultats contradictoires. Les performances annoncées et celles recensées sur l'ensemble des 88 cas industriels sont bonnes sur tous les axes. Sur les cas documentaires P1-2, on ne dispose que d'information partielle pour la plupart des entreprises. Seules 3 entreprises communiquent sur l'amélioration conjointe des 3 axes qui pose la question d'éventuel compromis. On note une confusion sur l'indicateur Lead Time qui correspond au temps de réponse au client et non au Lead Time Industriel c'est-à-dire le délai entre le lancement d'un ordre et sa mise à disposition. En l'absence de précision sur les cas documentaires, il est difficile de faire la différence entre les 2. Sur les retours d'expériences issus des entretiens semi directifs P1-3 et des visites d'entreprises P1-4, le temps de réponse au client est logiquement amélioré par l'instauration de buffer. Sur le lead time industriel, 2 entreprises nous ont fait part de son amélioration grâce à la libération de capacité permise par DDMRP.

Cependant, les résultats issus des simulations de la phase P2 ne sont pas aussi convaincants. Sur les simulations **in-vitro**, **l'OTD est bon sous condition de visibilité suffisante de la demande et de la création de lot de transferts**. Sur les expériences **in-vivo** (P2-2), les résultats de DDMRP sont inférieurs à la performance réelle des deux entreprises et à MRP2 simulé, ce qui signifie que les décisions humaines ne sont pas entièrement à l'origine de la performance actuelle. **Le contexte particulier de ces entreprises, pourrait expliquer ces contreperformances : rate based avec de très faible volume et des délais longs** conduisant à des DLT forts majorant le problème de taille de lot. Sur les cas in-vitro, l'OTD est bon sous réserve du paramétrage correct et de l'utilisation de lot de transfert.

Concernant le **niveau de stock**, les résultats ne permettent pas d'établir de généralités. Les placements des buffers P2-1 a logiquement un impact mais chaque situation industrielle peut conduire à des résultats très différents en fonction de la répartition des coûts. Des simulations pré-implantation peuvent permettre de déterminer le coût des buffers, cependant la formule proposée par DDMRP pour évaluer le stock cible n'a pas été confirmée. Il apparait que les montants sont supérieurs à ceux annoncés.

Par ailleurs, l'ensemble des plans d'expériences réalisés et leur calibrage, nous a montré une **sensibilité des résultats au paramétrage de DDMRP**. À ce stade, il ne nous a pas permis de la quantifier mais nous relevons un rôle majeur du DLT et du seuil de pic.

D5 Analyse Bénéfices/Risques

		Bénéfices/avantages	Inconvénients/Risque
Décision : choix du PPC	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Simplicité des POC (P1-3/A, P1-4/C) •Décision poussée par la volonté d'améliorer les stocks (P1-4/A, P1-5/C) 	<ul style="list-style-type: none"> •Philosophie très éloignée de la vision coût très largement ancrée (P1-4/A) •Manque de maturité sur les aspects SCM et performance industrielle (P1-3A)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> •Nombreux exemples français de réussite de projets DDMRP (P1-3A) •Assurer un meilleur taux de service au client (P1-4/A, P1-5/C) •Saisir de nouvelle opportunité de marché (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Aspect trop marketing de la méthode (P1-4/A) •Les anglicismes sont parfois vus comme rédhibitoires (P1-4/A)
Phase d'implantation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Facilité des concepts permettant une compréhension des utilisateurs (P1-3/A, P1-4/C) •Rapidité des résultats (P1-3/A, P1-4C) •Rapidité de mise en œuvre (P1-3/A, P1-4/C) •Possibilité de former en interne (P1-3/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) Non-implication de la direction générale (P1-3/A, P1-4/C) •Difficulté des paramétrages (P1-4/A) •Risque d'augmentation des stocks au lancement de DDMRP (P2-1/A, P2-2/C, P1-3/C, P1-4C) •Départ du leader (PO-1/A, P1-3/C) •Taille du projet initial (P1-4/A) •Absorption par une autre entreprise ne partageant pas la vision flux (P1-4/C)
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> •Des cabinets français en pointe (P1-3/A, P1-4/C) •Une communauté active qui partage les expériences (P1-4/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Dépendance au cabinet-conseil (P1-3/A, P1-4/C)
Phase d'utilisation	Interne	<ul style="list-style-type: none"> •Amélioration de la gestion des priorités (PO-1/A, P1-3/C, P1-4/C) •Amélioration considérable et unanime du travail des planificateurs notamment par le côté visuel de la méthode et la gestion des priorités (P1-3/A, P1-4/C) •Amélioration de la performance client (PO-1/A, P2-1/C, P1-3/C, P1-5C) •Plus de résilience en cas de problème (P1-3/A, P1-4/C) •Amélioration de la qualité des stocks (P1-3/A, P1-4/C, P1-5C) 	<ul style="list-style-type: none"> •Outils dépendants de l'ERP entretiennent la résistance au changement (P1-3/A, P1-4/C) •Augmentation possible des stocks à terme (P2-1/A, P1-3/C, P1-4/D, P1-5/C) •Besoin de polyvalence (cf. buffer de compétences) (P1-4A) •Absence d'outil de gestion de la capacité (P1-4/A) •Nécessité de modifier les indicateurs (P1-3/A) •Obligation de former / coût de la formation
	Externe	<ul style="list-style-type: none"> •Réduction du temps de réponse au client (P1-4/A) •Opportunité de marché par meilleure disponibilité (P1-5/A) 	<ul style="list-style-type: none"> •Non-implication des clients qui ne souhaitent pas partager le coût des buffers (P1-4/A) •Indiscipline des clients qui transmettent des ordres erratiques perturbant le système (P1-4/A)

À retenir

L'ensemble des éléments qualitatifs présentés dans le tableau sont détaillés dans le livrable D5. À titre de synthèse, nous retenons comme atouts majeurs la simplification du travail des planificateurs permise par la simplicité et le côté visuel de DDMRP et l'amélioration sans conteste de la gestion des priorités.

Du point de vue des points faibles, **l'absence d'outil de gestion de la capacité** dans DDMRP est beaucoup reprochée. Il nécessite le **développement d'outils interne ou bien le déploiement d'autres couches de DDAE**. Cependant, ces dernières ne font pas l'objet d'autant de développement que DDMRP pour le moment et sont donc moins mises en œuvre. De plus, le **changement total de vision** de la performance et d'approche dans la planification nécessite des transformations en profondeur majorant **la résistance au changement** et donc pas toujours évidentes à mettre en œuvre. Les entretiens réalisés ont **démontré l'importance de l'implication de la direction et de la formation massive** de l'ensemble des personnes impliquées dans le processus de planification. Cela inclut en plus des **planificateurs, les équipes logistiques et de production, les acheteurs voire la direction financière** qui doit apporter son soutien pour implanter une méthode qui remet les stocks au cœur du processus de production contrairement à ce qui est prôné par la vision Lean depuis plus de 20 ans. Enfin, les personnes interviewées qui trouvent pourtant la méthode simple signalent des difficultés de paramétrage notamment par manque de compréhension des implications.

A l'issue des analyses menées sur l'ensemble des livrables, nous formulons quelques recommandations et pistes de réflexions pour mener des itérations supplémentaires.

Recommandations

Ces recommandations sont formulées pour les utilisateurs de DDMRP en fonction de chaque phase du projet DDMRP

- Choix :
 - o Il n'existe pas de cas de ETO pour le moment, ce qui pose réellement l'intérêt de ce type de PPC pour cet environnement.
 - o L'intérêt pour les environnements rate based n'est pas confirmé, des POC sont donc nécessaires avant lancement du projet.
 - o L'implication de la direction est indispensable car DDMRP implique un changement radical de vision qui doit être aligné avec la stratégie générale.
 - o DDMRP est un PPC opérationnel qui n'embarque pas d'outil de gestion de la capacité. Les implications doivent être intégrées dès la phase de choix : nécessité d'outils complémentaires ou extension vers DDAE.
- Implantation
 - o D'un point de vue général :
 - La formation de l'ensemble des personnes impactées par le processus de planification doit être réalisée. Cela inclut planificateurs, les équipes logistiques et la production, les acheteurs voire la direction financière. La simulation est nécessaire pour évaluer non seulement l'impact du placement des buffers mais également celui du choix des paramètres.
 - o Du point de vue du paramétrage
 - Le critère DLT résultant des placements de buffers doit être pris en compte car il impact fortement les niveaux du buffer donc le stock total mais également la taille des ordres et le seuil de pic.
 - Le recours au maximum de la zone verte n'est pas forcément adapté à toutes les entreprises. Là encore une simulation en amont peut permettre de définir le choix le plus adapté.
 - Le seuil de pic doit être supérieur à la consommation périodique sous peine de créer du stock d'anticipation et de détecter trop de pics.
 - En cas de faible variabilité, opter pour un seuil de variabilité basé sur la consommation périodique.
- Utilisation
 - o La création de lots de transferts peut limiter l'impact des tailles d'ordre trop importante générées par DDMRP

Pistes de réflexion

Le travail mené a pour but d'évaluer DDMRP. À ce jour, questions restent en suspens et plusieurs pistes de recherche ont émergé :

- Environnement productif :
 - o Accessibilité de la méthode pour les TPE : est-ce que la taille de l'entreprise est un frein en soi ou plutôt un problème de moyens et/ou de maturité ?
 - o L'objectif initial du travail était de comprendre les facteurs influençant la performance. Par conséquent, les plans d'expérience ont été focalisés sur un environnement mono-produit. Maintenant que la compréhension est acquise, les environnements multiproduits doivent être testés pour évaluer la performance de DDMRP dans un environnement productif plus proche de la réalité industrielle.
 - o Complexité BOM : deux hypothèses majeures sous-tendent le plan d'expérience mené dans cette étude. La première est la faiblesse des délais unitaires conduisant à des DLT faibles et la seconde est la spécialisation des ressources sur une seule référence ce qui simplifie le flux de production. Ces hypothèses ne sont pas représentatives de la complexité de certains systèmes de production. Les résultats pourraient être assez différents avec des délais plus importants ou un partage de ressources productives. Des expériences complémentaires doivent être menées pour confirmer l'absence d'impact de la complexité de la nomenclature.
 - o Profil de la demande : l'adaptation de DDMRP aux demandes récurrentes de très faible volume n'est pas confirmée. Par ailleurs, le cas des demandes sporadiques n'a pas du tout été abordé.
 - o L'impact sur une chaîne logistique à plusieurs échelons n'a pas été testé. Il est possible que la taille des ordres soit un challenge.

- Paramétrage
 - o **Le DLT pourrait être un critère de placement des buffers** majeur à intégrer tel que tous les buffers aient **DLT < Horizon ferme**. L'horizon de visibilité des commandes est effectivement évoqué par DDMRP mais plutôt pour le produit fini. D'après les plans d'expériences réalisés, il semblerait que l'impact existe pour l'ensemble des buffers.
 - o La sensibilité des paramètres Facteur de variabilité et Seuil de pic semble être différente en fonction des DLT. Concernant **le Facteur de variabilité**, la recommandation est faite par DDMRP mais il n'existe pas d'aide à la décision pour **fixer objectivement** ce paramètre en **fonction du DLT**. Concernant **le seuil de pic**, il serait intéressant **de confirmer le besoin d'une gestion différenciée en fonction de la DLT**.
 - o Les propositions de choix pour le **seuil de pic** conduisent à des contreperformances en termes de niveau de stock notamment lors de l'abaissement du Facteur de variabilité en conjonction avec des DLT faibles. Une **nouvelle option pour seuil de pic : $CMJ * (1 + \text{écart type de la demande})$** pourrait être une piste permettant de limiter les effets pervers de l'abaissement de la variabilité tout en offrant une alternative basée sur une logique admise par les professionnels de la planification
 - o La formule du stock cible ne semble pas refléter la performance réelle en termes de niveau de stock. Des recherches plus précises doivent être menées pour vérifier les écarts et éventuellement proposer une alternative plus fiable.

Résumé

L'environnement économique est souvent caractérisé par l'acronyme VUCA (Volatile, Incertain, Complexe et Ambigu) pour décrire les fortes perturbations qu'il subit. Les conséquences sur les entreprises industrielles sont fortes et poussent les entreprises à investiguer de nouvelles solutions pour maintenir ou améliorer leur performance.

Parmi elles, l'adaptation ou le changement du système de pilotage de la production offre des perspectives intéressantes, conduisant à l'émergence de nouvelles méthodes de planification intégrées au sein des systèmes de Production Planning and Control (PPC). La question du contexte de performance de ces nouvelles méthodes se pose afin de les intégrer dans les choix potentiels. La revue de littérature montre que les principaux PPC peuvent être utilisés dans plusieurs contextes industriels ce qui laisse supposer qu'une évaluation plus fine est nécessaire pour choisir un PPC adapté. Dès lors, il paraît essentiel d'évaluer leur performance de façon globale en intégrant à la fois les retours d'expériences des utilisateurs et une analyse objective de leur comportement.

Face à cette problématique, nous avons développé un cadre méthodologique répondant à ce besoin. Nous proposons une approche basée sur 3 phases dont l'utilisation et le contenu sont adaptables en fonction du contexte industriel et des objectifs fixés. La proposition faite comprend le cadre lui-même mais également un ensemble d'outils et de méthodes permettant de comprendre, positionner et évaluer qualitativement et quantitativement le PPC étudié. L'utilisation de ce cadre est illustrée à travers l'étude de la méthode Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP).

Mots clés : Production and planning and control, modélisation, simulation à événements discrets, évaluation de la performance, DDMRP

Abstract

The economic environment is often characterized by the acronym VUCA (Volatile, Uncertain, Complex and Ambiguous) to describe the strong disruptions it is facing. The consequences on industrial companies are strong and lead companies to investigate new solutions to maintain or improve their performance.

Among them, the adaptation or change of the production planning and control system offers interesting perspectives, leading to the emergence of new planning methods integrated within the Production Planning and Control (PPC) systems. The question of the performance context of these new methods arises in order to integrate them into potential choices. The literature review shows that the main PPCs can be used in several industrial contexts, which suggests that a more detailed evaluation is necessary to choose a suitable PPC. Therefore, it seems essential to evaluate their performance in a global way by integrating both user feedbacks and an objective analysis of their behavior.

To address this issue, we have developed a methodological framework. We propose an approach based on 3 phases whose use and content can be adapted according to the industrial context and the objectives set. The proposal includes the framework itself but also a set of tools and methods to understand, position and evaluate qualitatively and quantitatively the PPC studied. The use of this framework is illustrated through the study of the Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP) method.

Keywords : Production and planning and control, modeling, discrete events simulation, performance evaluation, DDMRP