



**Titre:** Comparaison des approches DDMRP et EOQ : Modélisation et  
Title: simulation d'un cas d'étude

**Auteur:** Wajdi Tounsi  
Author:

**Date:** 2018

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Tounsi, W. (2018). Comparaison des approches DDMRP et EOQ : Modélisation et  
Citation: simulation d'un cas d'étude [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal].  
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3313/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/3313/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Robert Pellerin, & Pierre Baptiste  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

COMPARAISON DES APPROCHES DDMRP ET EOQ :  
MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN CAS D'ÉTUDE

WAJDI TOUNSI

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

COMPARAISON DES APPROCHES DDMRP ET EOQ :  
MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN CAS D'ÉTUDE

présenté par : TOUNSI Wajdi

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. GAMACHE Michel, Ph. D, président

M. PELLERIN Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D, membre

## DÉDICACE

*À ma famille*

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, mes remerciements et mes gratitude les plus sincères vont à tous ceux qui ont dirigé mon travail et je spécifie mon directeur de recherche, M Robert Pellerin. C'est grâce à son assistance et ses conseils fructueux que j'ai pu de conclure mes études par ce projet de recherche enrichissant.

Également, je voudrais remercier mon codirecteur de recherche M Pierre Baptiste pour son encadrement, sa disponibilité tout au long du travail de recherche et son guide à travers toutes les épreuves de mon parcours. Ainsi, je désire exprimer mes gratitude pour son encadrement remarquable et son écoute tout au long de ces deux années surtout pendant la phase de modélisation et simulation.

Un grand remerciement à M. Paul Brunelle pour toute son assistance logicielle et technique. De même, je tiens à remercier également toutes les personnes de l'équipe de l'École Polytechnique de Montréal et spécifiquement le département de mathématiques et de génie industriel. En somme, je voudrais également remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur soutien, de près ou de loin.

Je remercie toute ma famille pour leurs supports moraux, mes amis pour leurs écoutes ainsi que ses nombreux encouragements pendant ces deux années.

Enfin, mes remerciements et mes gratitude à vous : président et membres de jury.

## RÉSUMÉ

Demand Driven Material Requirement Planning est une nouvelle approche de planification et de contrôle de la production créée en 2011. Ainsi, DDMRP est devenue un sujet important puisqu'il était capable, selon quelques études, de mieux planifier la production et de la contrôler. Dans ce contexte, le but de ce projet consiste à évaluer DDMRP dans différents environnements en le comparant avec Economic Order Quantity. Le présent mémoire de maîtrise montre, à travers les résultats des expériences réalisées, que le DDMRP est plus performant que l'EOQ.

Ce mémoire comporte principalement cinq parties. Dans une première partie, nous avons défini toutes les étapes de DDMRP. Ensuite, nous avons vu un état de l'art autour de notre sujet et les contributions de chaque travail de recherche et ses limites. Ainsi, l'analyse de la littérature a permis de mettre la lumière sur ses lacunes et de justifier l'originalité de notre projet de recherche. À la fin de cette partie, nous avons présenté une revue critique de l'approche DDMRP.

Dans ce projet de recherche, nous avons utilisé principalement la simulation à évènement discret comme une méthode expérimentale pour modéliser le système et pour réaliser certaines expériences. Ainsi, nous avons utilisé la simulation à évènements discrets. En effet, elle est la technique la plus appropriée pour notre étude puisqu'elle est capable de reproduire le fonctionnement d'un système complexe et son évolution au cours du temps. Ensuite, nous avons présenté les différentes phases de notre méthodologie.

Les résultats des expériences montrent que le DDMRP est plus performant que l'EOQ dans les différents scénarios. En effet, avec moins de capital immobilisé dans les stocks et les encours, les pourcentages des commandes satisfaites directement à partir des stocks de DDMRP était toujours supérieurs à ceux de l'EOQ. Au niveau des temps d'écoulement « leads time », en comparant le DDMRP et l'EOQ, nous remarquons que le DMRP était capable de réduire considérablement les leads time moyens dans chaque atelier. Également, nous apercevons qu'avec DDMRP le fonds de roulement est moyennement inférieur et plus stable qu'à celui de l'EOQ.

## ABSTRACT

Demand Driven Material Requirement Planning is a new approach to planning and controlling production created in 2011. Since its creation, DDMRP has become an important topic as it was able, according to some studies, to better plan production and control it. In this context, the purpose of this project is to evaluate the DDMRP in different environments by comparing it with Economic Order Quantity. This master thesis confirms, through the results of the experiments carried out, that the DDMRP is more efficient than the EOQ.

This thesis has mainly five parts. In a first part, we defined all the steps of DDMRP. Then, we presented a state of the art around the DDMRP and the contributions of each research work and its limitations. Thus, the analysis of the literature has made it possible to shed light on its shortcomings and to justify the originality of our research project. Finally, we presented a critical review of the DDMRP approach in order to demonstrate the pillars that we suggested to be studied in the future.

In this research project, we mainly used discrete event simulation as an experimental method to model the system and to perform certain experiments. Thus, we used the discrete event simulation. Indeed, it is the most appropriate technique for our study since it is able to reproduce the performance of a complex system and its evolution over time. Then we presented the different phases of our methodology.

The results of the experiments show that DDMRP was more efficient than the EOQ in the different scenarios. Indeed, with less capital tied up in inventories and outstanding, the percentages of orders satisfied directly from the DDMRP stocks were still higher than those of the EOQ. In terms of lead time, comparing the DDMRP and the EOQ, we noticed that the DMRP was able to significantly reduce the average lead time in each workshop. Also, we see that with the DDMRP the working capital is moderately lower and more stable than that of the EOQ.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES .....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XV
LISTE DES ANNEXES .....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Introduction générale.....	1
1.2 Objectifs et défis.....	2
1.3 Méthodologie de recherche .....	3
1.4 Structure du mémoire .....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	5
2.1 Demand Driven Material Requirement Planning.....	5
2.1.1 Positionnement stratégique des stocks .....	6
2.1.2 Détermination des profils des buffers .....	6
2.1.3 Ajustement dynamique.....	8
2.1.4 Planification pilotée par la demande .....	9
2.1.5 Exécution collaborative et visible .....	10
2.2 État de l’art .....	11
2.3 Revue critique .....	14

2.4	Conclusion.....	16
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....		17
3.1	Questions de recherche.....	17
3.2	Méthodologie de recherche .....	17
3.2.1	Phase 1 : Définir le problème et décrire le modèle conceptuel .....	17
3.2.2	Phase 2 : Modéliser le système .....	18
3.2.3	Phase 3 : Vérification et validation des modèles.....	19
3.2.4	Phase 4 : Fixer le plan d'expériences et déterminer les indicateurs de performance.....	20
3.2.5	Phase 5 : expérimenter et interpréter.....	22
3.2.6	Phase 6 : conclusion et recommandation .....	23
3.3	Conclusion.....	23
CHAPITRE 4 MODÉLISATION DU SYSTÈME.....		24
4.1	Présentation du modèle conceptuel .....	24
4.1.1	Présentation de l'entreprise .....	24
4.1.2	Description des produits fabriqués .....	25
4.1.3	Description des processus .....	26
4.2	Formuler les entrées et les hypothèses .....	28
4.2.1	Formulation des entrées .....	28
4.2.2	Formulation des hypothèses .....	28
4.3	Construction du modèle .....	29
4.3.1	Modélisation des ateliers.....	30
4.3.2	Importation des données.....	31
4.3.3	Traitement des demandes des produits finis .....	32
4.3.4	Processus d'affectation des opérateurs dans un atelier .....	32

4.4	Construction du modèle utilisant EOQ .....	36
4.4.1	Point de commande .....	36
4.4.2	Quantité économique de commandes.....	36
4.4.3	Génération des ordres de fabrications .....	41
4.5	Construction du modèle DDMRP .....	42
4.5.1	Positionnement stratégique des buffers.....	42
4.5.2	Détermination des profils des buffers .....	42
4.5.3	Ajustement dynamique des buffers .....	45
4.5.4	Planification pilotée par la demande .....	46
4.5.5	Exécution collaborative et visible .....	47
4.6	Vérification et validation du modèle .....	48
4.7	Conclusion.....	50
CHAPITRE 5 EXPÉRIENCES, RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....		51
5.1	Plan d'expérience .....	51
5.2	Expérimentation et interprétation.....	52
5.2.1	1 <sup>ère</sup> expérience : résultats et interprétation .....	52
5.2.2	2 <sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation .....	58
5.2.3	3 <sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation .....	63
5.2.4	4 <sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation .....	67
5.3	Interprétation .....	73
5.4	Conclusion.....	73
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....		74
BIBLIOGRAPHIE .....		76
ANNEXES .....		79

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Calcul de la zone rouge .....	7
Tableau 4.1 : Coût de set up dans le premier atelier .....	37
Tableau 4.2 : Coût de set up dans l'atelier 2.....	37
Tableau 4.3 : Coût de set up dans l'atelier 3.....	37
Tableau 4.4 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 3 .....	39
Tableau 4.5 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 3 (suite) .....	39
Tableau 4.6 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 2 .....	39
Tableau 4.7 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 2 (suite) .....	39
Tableau 4.8 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 1 .....	40
Tableau 4.9 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 3.....	43
Tableau 4.10 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 3 (suite) .....	43
Tableau 4.11 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 2.....	43
Tableau 4.12 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 2 (suite) .....	44
Tableau 4.13 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 1.....	44
Tableau 4.14 : Tester les conditions extrêmes .....	49
Tableau 5.1 : Plan d'expérience .....	52
Tableau 5.2 : 1 <sup>ère</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients .....	53
Tableau 5.3 : 1 <sup>ère</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks .....	54
Tableau 5.4 : 1 <sup>ère</sup> expérience : fonds de roulement moyens .....	55
Tableau 5.5: 1 <sup>ère</sup> expérience : les leads times moyens .....	56
Tableau 5.6 : 2 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients .....	58
Tableau 5.7 : 2 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens.....	59
Tableau 5.8 : 2 <sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens.....	60

Tableau 5.9 : 2 <sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens .....	61
Tableau 5.10 : 3 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients .....	63
Tableau 5.11 : 3 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens.....	64
Tableau 5.12 : 3 <sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens.....	65
Tableau 5.13 : 3 <sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens .....	66
Tableau 5.14 : 4 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients .....	68
Tableau 5.15 : 4 <sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens.....	69
Tableau 5.16 : 4 <sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens.....	70
Tableau 5.17 : 4 <sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens .....	71
Tableau C.2 : Les temps de traitement des différents postes utilisés pendant la simulation .....	81
Tableau D.1 : Les temps de set up des différents postes .....	82

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Les cinq composants du DDMRP (Ihme, 2015).....	5
Figure 2.2 : Les catégories d'articles en DDMRP (Hietikko, 2014).....	9
Figure 2.3 : Les alertes de DDMRP (Hietikko, 2014) .....	10
Figure 3.1 : Cycle de vérification du modèle de simulation (kossar, 2017) .....	19
Figure 4.1 : Configuration de l'usine simulée .....	24
Figure 4.2 : Nomenclature générale d'une roue.....	25
Figure 4.3 : Exemple de la modélisation des ateliers (troisième atelier) .....	30
Figure 4.4 : Capture d'écran de l'importation des données.....	31
Figure 4.5 : Traitement des demandes des produits finis .....	32
Figure 4.6 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs .....	33
Figure 4.7 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs (partie 1) .....	33
Figure 4.8 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs (partie 2) .....	34
Figure 4.9 : Capture d'écran de la fusion de l'opérateur et le lot de fabrication.....	35
Figure 4.10 : Capture d'écran de la séparation de l'opérateur et le lot de fabrication.....	35
Figure 4.11 : Capture d'écran du processus de réajustement des paramètres.....	41
Figure 4.12 : Capture d'écran du processus de génération des OF dans le Module EOQ.....	41
Figure 4.13 : Positionnement stratégique des buffers .....	42
Figure 4.14 : Capture d'écran du mécanisme de réajustement des paramètres du DDMRP .....	45
Figure 4.15 : Ajustement des paramètres .....	45
Figure 4.16 : Capture d'écran du processus de la planification de la demande en DDMRP.....	46
Figure 4.17 : Capture d'écran du processus d'ajustement des priorités.....	47
Figure 5.1 : 1 <sup>ère</sup> expérience : évolutions des niveaux de stocks moyens.....	54
Figure 5.2 : 1 <sup>ère</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens.....	55

Figure 5.3 : 1 <sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3.....	56
Figure 5.4 : 1 <sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2.....	57
Figure 5.5 : 1 <sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1.....	57
Figure 5.6 : 2 <sup>ème</sup> expérience : évolutions des niveaux de stocks moyens.....	59
Figure 5.7 : 2 <sup>ème</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens.....	60
Figure 5.8 : 2 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3.....	61
Figure 5.9 : 2 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2.....	62
Figure 5.10 : 2 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1.....	62
Figure 5.11 : 3 <sup>ème</sup> expérience : évolution des niveaux de stocks moyens .....	64
Figure 5.12 : 3 <sup>ème</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens.....	65
Figure 5.13 : 3 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3.....	66
Figure 5.14 : 3 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2.....	67
Figure 5.15 : 3 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1.....	67
Figure 5.16 : 4 <sup>ème</sup> expérience : évolution des niveaux des stocks moyens.....	69
Figure 5.17 : 4 <sup>ème</sup> expérience : évolution des fonds de roulement moyens.....	70
Figure 5.18 : 4 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3.....	71
Figure 5.19 : 4 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2.....	72
Figure 5.20 : 4 <sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1.....	72
Figure A.1 : Les combinaisons possibles des buffers .....	79
Figure A.2 : Les différents types de buffers.....	80
Figure E.1 : Les courbes de refroidissement du réchauffement du four .....	83
Figure F.1 : Capture d'écran des files d'attente des lots lors de la création.....	84
Figure G.1 : Exemple d'un scénario de la première expérience .....	85
Figure H.1 : Exemple d'un scénario de la deuxième expérience (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9) .....	86

Figure H.2 : Exemple d'un scénario de la deuxième expérience (PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18).....	88
Figure H.3: Exemple d'un scénario de la deuxième expérience (PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27).....	88
Figure I.1 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9) .....	89
Figure I.2 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18).....	90
Figure I.3 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27).....	91
Figure J.1 : Exemple d'un scénario de la quatrième expérience .....	92

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BOM	Bill Of Materials
DDMRP	Demand Driven Material Requirement Planning
DMA	Demande Moyenne Annuelle
DRP	Distribution Requirements Planning
EOQ	Economic Order Quantity
EPQ	Economic Production Quantity
ERP	Entreprise Ressource Planning
FIFO	First In First Out
LT	Lead time
MOQ	Minimum Order Quantity
MRP	Material Requirements Planning
MRPII	Manufacturing Resource Planning
MTO	Make To Order
MTS	Make To Stock
PC	Point de Commande
RB	Rouge Base
RS	Rouge Safety
SED	Simulation à Évènement discret
TB	Taille du Buffer
TOC	Theory Of Constraints
WC	Working capital
ZJ	Zone Jaune
ZV	Zone Verte

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – TOUTES COMBINAISONS POSSIBLES DES BUFFERS .....	79
ANNEXE B – TOUS LES TYPES DE BUFFERS .....	80
ANNEXE C – LES TEMPS DE TRAITEMENT DES DIFFÉRENTS POSTES UTILISÉS PENDANT LA SIMULATION .....	81
ANNEXE D – LES TEMPS DE SET UP DES DIFFÉRENTS POSTES .....	82
ANNEXE E – COURBES ÉTAT DE FOUR .....	83
ANNEXE F – EXEMPLES D’UN SCÉNARIO DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE.....	85
ANNEXE G – EXEMPLES D’UN SCÉNARIO DE LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE .....	86
ANNEXE H – EXEMPLES D’UN SCÉNARIO DE LA TROISIÈME EXPÉRIENCE .....	89
ANNEXE I – EXEMPLES D’UN SCÉNARIO DE LA QUATERÈME EXPÉRIENCE.....	92

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Ce chapitre vise à introduire le mémoire de maîtrise et le mettre dans son contexte. Principalement, il se compose de trois parties. La première partie est une introduction générale. Elle vise à mettre le lecteur dans le contexte. La deuxième partie présente les objectifs et les défis de ce projet de recherche. Finalement, la dernière partie vise à définir le contenu de ce projet.

### 1.1 Introduction générale

*« Travailler à la prévision a été comparé à la conduite d'une voiture en regardant le rétroviseur. Cependant, aujourd'hui, la route est une route de montagne tordue dans un brouillard dense et les pénalités pour l'erreur sont importantes »* (Patk et Smith, 2011).

En effet, l'environnement actuel n'est plus celui des années soixante-dix et est devenu très compétitif. La demande des clients n'est plus stable et n'est plus simple à prévoir. Les chaînes de production et les chaînes logistiques sont de plus en plus complexes et difficiles à gérer et à contrôler.

Ainsi, la planification en besoin de matière ou « *Material Requirement Planning* » (MRP), inventé dans les années soixante-dix, n'est plus adéquat. Cette méthode utilise des données prises du Master Production Schedule MPS, du lead Time réel, des niveaux de stocks et de la nomenclature du produit. Il s'agit d'une technique de production à flux poussé basée sur les prévisions et l'historique des ventes (McGaughey et Gunasekaran, 2007).

Au cours des années quatre-vingt, la MRP s'est développée en MRPII et s'est appelée « *Manufacturing Resource Planning* ». MRPII assure la planification de la production avec un management efficace des ressources de l'entreprise (Chung et Synder, 2000). Grâce au développement des technologies de l'information, MRPII a été intégré dans des logiciels puissants appelés « *Entreprise Ressource Planning* ». Ces logiciels assurent la planification et le contrôle de la production en intégrant plusieurs fonctionnalités comme la finance, la maintenance, la gestion des ressources, la logistique, les inventaires, etc...

Cependant, les systèmes ERP génèrent des stocks et des temps d'attente. De ce fait, des philosophies sont apparues comme le *lean manufacturing* « *Just in Time* » JIT et la théorie des contraintes « *Theory Of Constraints* » TOC, etc... Ces philosophies ont des méthodes dont la logique

est basée sur les flux tirés permettant de réduire ces gaspillages (Taylor, 2002). Par ailleurs, les entreprises ont investi dans des algorithmes afin d'intégrer ces philosophies dans leurs ERP classiques et de mieux prévoir les demandes des clients. Ainsi, les ERP sont devenus plus puissants. Cependant la logique reste la même, celle du MRP des années soixante-dix.

Dans ce contexte, Ptak et Smith (2016) affirment que « *Payer de grosses sommes d'argent pour des algorithmes de prévision plus sophistiqués signifie simplement que vous avez un rétroviseur plus cher* ». Ils proposent ainsi une nouvelle approche de planification et de contrôle de la production appelée « Demand Driven MRP ».

La planification des besoins en matière pilotée par la demande ou en anglais « Demand Driven MRP » est une nouvelle approche de planification et de contrôle de la production. Elle repose les points forts de la MRP et élimine ses faiblesses en intégrant les avantages de la distribution des ressources (en anglais, *Distribution Resource Planning* (DRP)), du *lean manufacturing* et de la théorie des contraintes. En effet, les besoins sont créés directement à partir des demandes clients (Miclo et al., 2015).

La DDMRP s'est développée en 2011. Il s'agit d'une approche dont l'objectif est d'assurer la planification de la production en besoins de matière et de la contrôler. En effet, le principe de DDMRP consiste à protéger les flux de matières et d'information en utilisant des tampons appelés « *buffers* ». Selon Sullivan, Ried et Cartier (2007), les buffers sont des mécanismes de « *feedback* » capables de fournir des alertes. Ces derniers permettent de prioriser le travail, de savoir quand accélérer, et de fournir une capacité de protection suffisante. Ainsi, ils assurent le découplage afin d'absorber les différentes formes de variations et de fluctuations (Angela, 2016).

Selon Ptak et Smith (2011), DDMRP est une approche permettant de mieux gérer la production et de contrôler les différents niveaux de stocks. Ainsi, au cours des dernières années, DDMRP a reçu beaucoup d'attention des cabinets de consultation et du milieu industriel et académique.

## 1.2 Objectifs et défis

Depuis 2011, des projets académiques et des articles scientifiques sont rédigés autour de DDMRP. Dans cette littérature, les chercheurs ont étudié DDMRP et son efficacité à gérer les différentes variabilités de l'environnement. Globalement, ils ont été capables de montrer que le DDMRP est plus efficace que le système MRPII et Kanban pour planifier et contrôler la production. Cependant,

aucun auteur, n'a comparé DDMRP et « *Economic Order Quantity* » (EOQ). En effet, l'EOQ est une approche importante permettant aux entreprises de minimiser leurs coûts d'inventaire et de trouver un équilibre entre le nombre de commandes par an et le coût de détention annuel. Ainsi, l'EOQ peut être utilisée dans un processus de planification et contrôle de la production.

De ce fait, le but de ce projet de recherche est de comparer, à travers certains indicateurs de performance, l'efficacité de DDMRP et de l'EOQ comme des approches permettant de déclencher les ordres de fabrication et les priorisés dans les ateliers. Ce but peut être reformulé dans la question de recherche suivante :

- *Est-ce que DDMRP gère la production (déclenchement des ordres de fabrication) et les stocks mieux que EOQ ?*

Ainsi, dans ce projet, nous souhaitons vérifier les hypothèses suivantes :

H1: DDMRP aide à absorber l'amplification de la demande (l'effet de fouet) ;

H2: DDMRP garde les inventaires dans des meilleurs états ;

H3: DDMRP est capable de résister contre les variabilités de la demande ; et

H4: DDMRP garantit la satisfaction des clients.

### **1.3 Méthodologie de recherche**

Dans ce projet, nous allons utiliser la simulation à événements discrets comme principale méthodologie de recherche. Elle sera détaillée dans le troisième chapitre. En effet, notre méthodologie englobe cinq phases qui consistent principalement à définir les processus de fabrication de notre cas d'étude et à formuler les hypothèses. Une fois les hypothèses et les entrées sont formulées, nous passons à la deuxième phase. Il s'agit de construire, vérifier et valider le modèle de simulation. Finalement, les différentes expériences sont développées et les résultats sont présentés puis ils sont interprétés.

### **1.4 Structure du mémoire**

Afin de répondre à la question de recherche précédemment posée, le présent mémoire est structuré de la façon suivante. Le chapitre suivant est une revue de littérature des travaux effectués dans le domaine. Il sert à introduire le DDMRP puis à présenter les différents apports pertinents réalisés

en lien avec la DDMRP. Le troisième chapitre est consacré à présenter la méthodologie de recherche puis à décrire ses différentes étapes. Il inclut également une description de notre cas d'étude. Ensuite, le quatrième chapitre vise à décrire les modèles de simulation et leurs différents processus. Quant à cinquième chapitre, il sert à présenter les différentes expériences réalisées puis à interpréter les différents résultats trouvés. Finalement, un dernier chapitre vise à présenter les conclusions et les recommandations pour les futures recherches.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature scientifique autour du DDMRP. Il est composé de trois parties. La première partie vise à introduire et à définir le DDMRP, ses différentes étapes et ses concepts. La deuxième partie vise à présenter une synthèse des différents travaux faits en relation avec notre sujet, leurs contributions et leurs limites. Finalement, la dernière partie présente une revue critique des travaux de recherche portant sur le DDMRP.

### 2.1 Demand Driven Material Requirement Planning

La planification des besoins en matière pilotée par la demande DDMRP est une approche de la planification et de contrôle de la production dont la logique est de protéger les flux contre les variabilités. Le DDMRP repose sur certains principes fondamentaux du MRP et sur les logiques des philosophies et des méthodes modernes comme la planification de la distribution des ressources DRP, la théorie des contraintes TOC et les principes du Lean (Angela, 2016).

Dès sa création en 2011, Ptak et Smith ont défini les composants du DDMRP. D'ailleurs, ils affirment qu'« ignorer une ou plusieurs étapes du DDMRP réduira considérablement les résultats du DDMRP ». Pour cela, ces composants sont présentés soigneusement dans la suite. Il s'agit de cinq composants : positionnement stratégique des stocks, détermination des profils des buffers et des niveaux de stock, ajustement dynamique des buffers, planification tirée par la demande et l'exécution visible et en collaboration (Ptak et Smith, 2011).

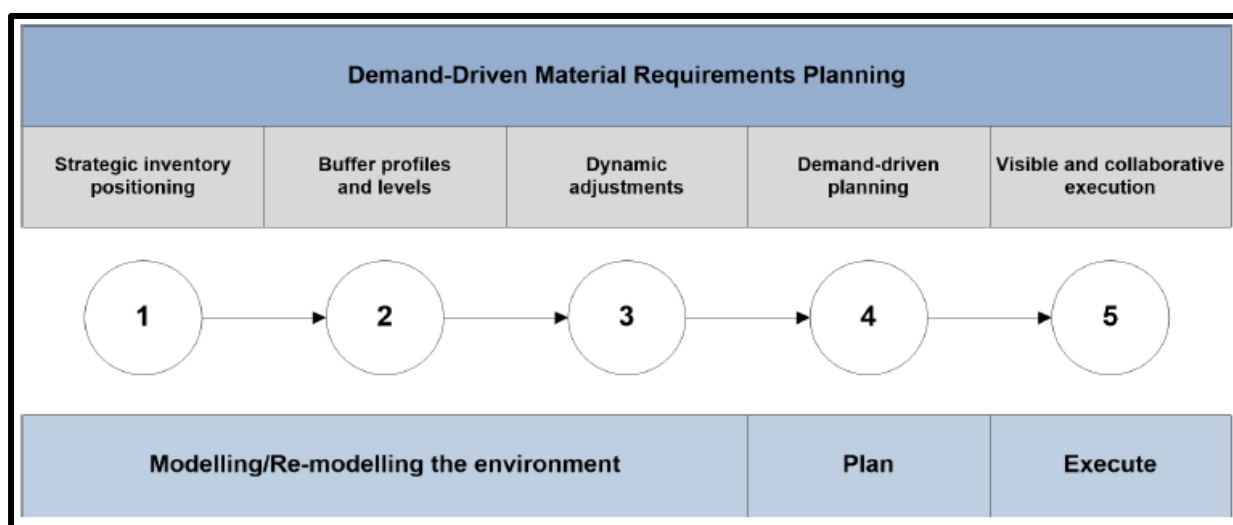


Figure 2.1 : Les cinq composants du DDMRP (Ihme, 2015)

### **2.1.1 Positionnement stratégique des stocks**

La première étape du DDMRP est le positionnement stratégique des stocks. Il s'agit de répondre à la question suivante : où l'inventaire doit-il être placé afin d'avoir la meilleure protection du système (la production) contre les variabilités de l'environnement (demandes clients) (Hietikko, 2014)? Le positionnement stratégique des stocks se fait en tenant compte de six facteurs clés qui sont : le temps de tolérance du client, le délai potentiel du marché, la variabilité de la demande, la variabilité de l'offre, le levier d'inventaire et la flexibilité et la protection critique (Miclo, 2015).

C'est ainsi qu'un facteur est introduit et qui présente la notion centrale du DDMRP. Il s'agit d'un nouveau lead Time appelé le délai de réapprovisionnement activement synchronisé (en anglais, Actively Synchronized Replenishment Lead Time) «ASRLT ». Il est défini comme la plus longue séquence non stockée ou non protégée dans la nomenclature BOM d'un parent bien déterminé (Shofa1 et Widyarto, 2016).

Le positionnement stratégique des stocks est ainsi fait par la fusion entre la matrice BOM et l'ASRLT. En effet, la matrice BOM est une représentation matricielle où les composants sont dans les rangées et les parents dans les colonnes. Dans chaque case de cette matrice, l'ASRLT est calculé pour chaque composant du parent. Ce qui donne une visibilité claire sur le positionnement stratégique des stocks (Angela, 2016).

### **2.1.2 Détermination des profils des buffers**

La détermination des profils des buffers consiste à dimensionner les zones des buffers. C'est-à-dire déterminer le niveau de chaque zone. En effet, chaque buffer est constitué de trois zones superposées. Soit respectivement la zone rouge, la zone jaune et la zone verte (Miclo, 2016).

Pour calculer chacun des niveaux de ces zones des buffers, il faut tenir compte de quatre caractéristiques fondamentales :

- Le type de composant : acheté (P), fabriqué (M) ou distribué (D);
- La variabilité, classifiée en trois catégories : forte, moyenne ou basse;
- Le lead time, séparé en trois classes : long, moyen et court; et
- Les limitations des tailles des lots, s'il existe une quantité minimale par commande ou non.

Il en résulte 54 combinaisons possibles, présentées à l'annexe A (Ihme, 2015).

Par ailleurs, chacune des zones dans un buffer détermine les priorités de planification et d'exécution. En effet, la zone verte représente un état « tout va bien ». Donc, aucune action n'est requise. La zone jaune représente un état de « réapprovisionnement ». C'est-à-dire que le composant en question doit être réapprovisionné. Quant à la zone rouge, elle représente un état de « danger » donc une attention spéciale est requise (Angela 2016). Dans le modèle décrit par « demande driven institute », la zone rouge comporte deux sous-zones. Soit la zone rouge base et la zone rouge sécurité (Shofa et Widyarto, 2016).

Ptak et Smith (2011) proposent certaines recommandations pour dimensionner chaque zone. En effet, le calcul des zones se fait en utilisant une fonction du lead time (LT) et de la consommation journalière moyenne (ADU). Généralement, la zone jaune est la zone plus grande. Elle est déterminée à partir de la formule suivante.

$$(1) \text{ Zone jaune} = \text{ADU} \times \text{LT}.$$

D'autre part, le calcul de la zone rouge dépend du lead Time et de la variabilité de la demande comme il est décrit dans le tableau suivant (Ihme, 2015).

Tableau 2.1: Calcul de la zone rouge

Variabilité	Rouge sécurité	Lead time	Rouge base
Élevée	61 – 100% Zone Rouge de base	Long	20 – 40% ADU* LT
Moyenne	41 – 60% Zone Rouge de base	Medium	41 – 60% ADU* LT
Basse	20 – 40% Zone Rouge de base	Court	61 – 100% ADU* LT

Quant à la zone verte, le calcul s'effectue en prenant le maximum des trois valeurs suivantes :

$$(2) \text{ Zone verte} = \text{zone jaune} \times \text{facteur du Lead Time},$$

$$(3) \text{ Zone verte} = \text{MOQ « Minimum Order Quantity »},$$

$$(4) \text{ Zone verte} = \text{ADU} \times \text{temps de cycle imposé ou désiré}.$$

Finalement la taille du buffer est égale à zone rouge + zone jaune + zone verte (Miclo, 2015).

### 2.1.3 Ajustement dynamique

Étant donné que les facteurs définis précédemment (LT, ADU, etc.) ne sont pas stables au cours du temps, l'ajustement des buffers est nécessaire. Selon Ptak et Smith (2016), il existe trois types d'ajustement dynamique. Soit l'ajustement recalculé, l'ajustement planifié et l'ajustement manuel (Shofa et Widyarto, 2016).

#### - Ajustement recalculé

Il existe deux types d'ajustement recalculé. L'un est basé sur l'ADU et l'autre est basé sur l'occurrence des zones. Ce dernier consiste à ajuster les zones selon le nombre d'occurrences. Par exemple, trop d'occurrences pour la zone rouge ou la zone verte signifie que la taille du buffer est petite (Ihme, 2015). Afin de procéder avec l'ajustement recalculé basé sur l'occurrence des zones, il est indispensable d'enregistrer les occurrences. Ensuite, il faut définir un intervalle de temps approprié et trouver la taille d'ajustement de buffer appropriée (Hietikko, 2014). De ce fait, l'ajustement recalculé basé sur l'occurrence des zones est difficile à faire. C'est pourquoi Ptak et Smith (2011) recommandent l'ajustement recalculé basé sur l'ADU. D'ailleurs, il est le plus utilisé. Il consiste à ajuster les buffers en fonction des changements de l'ADU dans un horizon mobile (Angela, 2016).

#### - Ajustement planifié

L'ajustement planifié est basé sur les plans stratégiques et les historiques où des changements de la demande auront lieu (période de saisonnalité, croissance ou décroissance des ventes) (Ptak et Smith, 2011). Pour les périodes de saisonnalité, les buffers sont ajustés par le fait que la consommation moyenne journalière ADU, elle-même, est ajustée. Pour la croissance ou la décroissance des ventes, l'ADU est ajusté par un facteur (pourcentage) significatif (Miclo, 2015).

#### - Ajustement manuel

Afin de procéder par un ajustement manuel, il faut mettre en place des alertes. Le but est de créer des alertes contre les changements non planifiés. En effet, ces alertes permettent d'anticiper les périodes où le changement de l'ADU est très rapide (Hietikko, 2014). Selon Ptak et Smith (2011), nous pouvons distinguer trois types d'alertes. Soit l'alerte ADU, le seuil d'alerte ADU et l'horizon d'alerte ADU (Angela, 2016).

### 2.1.4 Planification pilotée par la demande

La planification pilotée par la demande consiste à répartir les articles (les composants et les parents) dans deux grandes familles. Soit les articles stockés et les articles non stockés.

Les articles stockés englobent trois catégories : les articles réapprovisionnés, les articles réapprovisionnés forcés et les articles Min-Max (Ihme, 2015). En effet, les articles réapprovisionnés sont les articles gérés par des buffers comme il décrit ci-haut. Ces buffers sont dynamiques et doivent être ajustés par une des méthodes d'ajustements (Angela, 2016). Les articles réapprovisionnés forcés sont aussi gérés par des buffers comme les articles réapprovisionnés, mais leurs buffers sont stables, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas ajustés à cause d'une contrainte d'espace de stockage. Quant aux articles Min-Max, ils représentent les articles les moins stratégiques de l'entreprise. Ils sont gérés par la méthode « point de commande » (semblable à un buffer sans la zone jaune) (Hietikko, 2014).

Les articles non stockés englobent les articles non bufférisés et les articles gérés sur Lead-Time-Managed (LTM). Selon Ptak et Smith (2016), la plupart des articles sont des articles non bufférisés (des articles non stratégiques). Leurs besoins sont gérés sur demande (Make to Order). D'autre part, les articles gérés sur Lead-Time Managed sont gérés par des buffers. Contrairement à tous les autres articles bufférisés, les articles gérés sur Lead-time Managed ont des buffers de temps à la place des buffers de stocks. L'annexe B présente des exemples de tous les types de buffers (Hietikko, 2014).

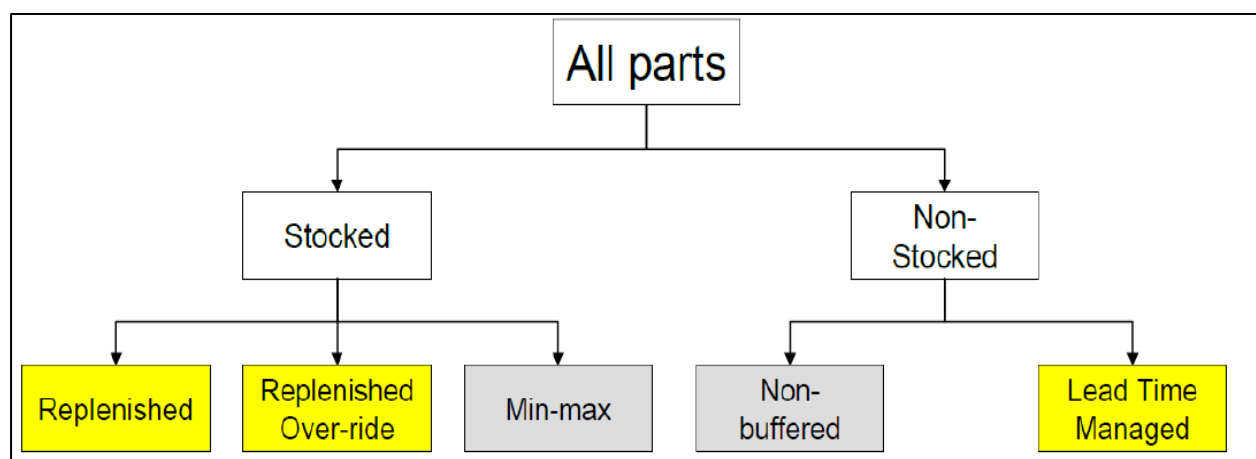


Figure 2.2 : Les catégories d'articles en DDMRP (Hietikko, 2014)

Pour les articles réapprovisionnés et les articles réapprovisionnés forcés, les ordres de fabrication sont générés en utilisant l'équation du flux (*Available stock*) qui est défini par :

$$\text{Stock projeté} = \text{stock physique} + \text{ordre lancé} - \text{demande réelle qualifiée} \quad (5)$$

En effet, la position de flux disponible dans un buffer détermine la taille du lot à réapprovisionner et sa priorité. En effet, la taille de lot correspond à la taille du buffer moins la valeur de l'équation du flux. Cependant, la priorité est le rapport entre le flux disponible et la taille du buffer (Hietikko, 2014).

### 2.1.5 Exécution collaborative et visible

Du point de vue de l'exécution, DDMRP intègre un mécanisme d'alerte dont le but est d'anticiper les problèmes de rupture de stock et les retards des livraisons. Il existe deux types de mécanisme d'alertes : les « alertes des statuts des buffers » et les « alertes de synchronisation ».

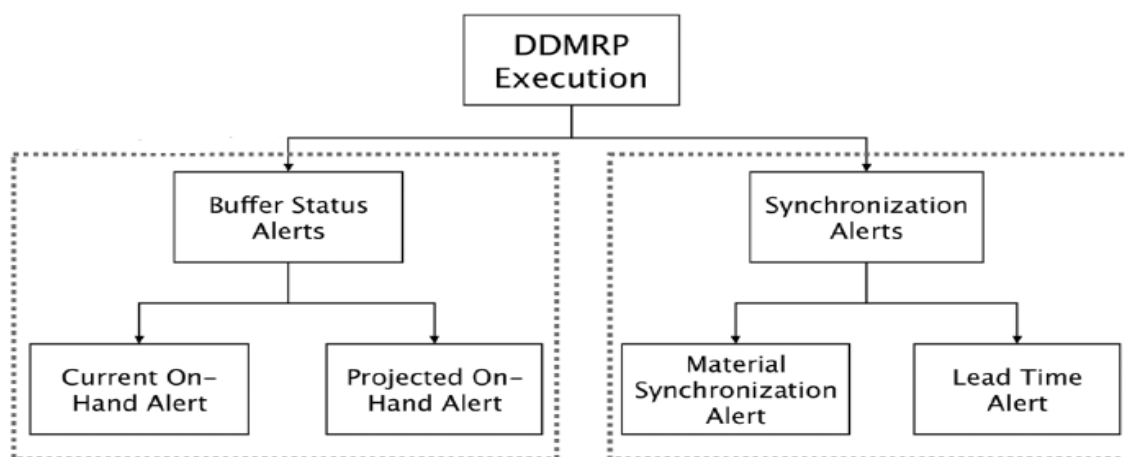


Figure 2.3 : Les alertes de DDMRP (Hietikko, 2014)

Les alertes de synchronisation sont basées sur les dates d'échéances. Leur but est d'éviter les retards potentiels. Cependant, les alertes des statuts des buffers sont pilotées par la position du stock physique ou la position du stock physique projeté. Les alertes de synchronisation et les alertes des statuts des buffers, codées par des couleurs et des pourcentages, offrent un management visuel aux planificateurs de la production qui permet de contrôler les états de stocks, les ordres lancés et d'anticiper ainsi les ruptures de stock.

En point de vue pratique, DDMRP nécessite une exécution collaborative entre tous les départements de l'entreprise (département de la planification, département de la fabrication, département d'achat, département marketing, etc.) afin d'accélérer la circulation des informations dans l'usine.

## 2.2 État de l'art

Après avoir expliqué les étapes de DDMRP, il est nécessaire de passer en revue les travaux de recherche dans ce domaine. Ainsi, cette section vise à présenter une synthèse des différents travaux académiques faits en relation avec DDMRP, leurs contributions et leurs limites. Ces travaux sont principalement les articles, les mémoires et les thèses publiés au cours des dernières années.

Nous allons commencer par la thèse de Ihme (2015). Ses contributions ont été importantes puisqu'il s'agit de la première thèse au monde qui traite du DDMRP. Il s'agit d'une simulation du DDMRP en utilisant les données d'une entreprise qui se trouve en Allemagne. Après la simulation en utilisant DDMRP comme étant une approche de planification et de contrôle de la production, l'auteur a constaté beaucoup d'avantages. En effet, les stocks des produits finis et des matières premières et les leads times ont été réduits. De plus, les plans de production sont devenus plus stables et plus réactifs à la demande (Ihme, 2015).

Les résultats trouvés montrent de grandes améliorations pour l'entreprise utilisée pour les tests, cependant selon l'affirmation de l'auteur lui-même, les résultats trouvés ne peuvent pas être généralisés en raison de la mauvaise situation de l'entreprise et de l'inefficacité de son système de planification et du contrôle de la production (le système ERP). De ce fait, il était difficile de séparer les gains du DDMRP de ceux liés à la simple amélioration du système de planification et de contrôle de la production de l'entreprise (Ihme, 2015).

Au point de vue de la chaîne logistique, Hietikko (2014) a étudié dans son mémoire les améliorations qui pourraient être obtenues à la suite de l'implémentation du DDMRP dans une chaîne logistique qui est non verticalement intégrée en utilisant les données d'une entreprise en Finlande.

Selon l'auteur, les résultats trouvés montrent que l'intégration du DDMRP dans la chaîne logistique était capable de réduire les niveaux de stocks et les délais de livraison. Dans un deuxième lieu,

l'auteur a montré l'importance de la collaboration entre les différents maillons de la chaîne logistique pour améliorer le rendement du DDMRP (Hietikko, 2014).

Bien que l'étude faite soit basée sur les théories du DDMRP (Ptack et Smith, 2016), les résultats trouvés restent contestables. En effet, l'étude était totalement théorique. De plus, beaucoup d'hypothèses sont nécessaires lors de la modélisation, ce ne permet pas de justifier les résultats.

Miclo et al ont publié deux articles respectivement en 2015 et en 2016 dont l'objectif était de comparer MRPII et DDMRP.

Dans l'article publié en 2016, les résultats trouvés montrent que DDMRP était plus puissant que MRPII à atteindre un pourcentage de commandes livrées à temps avec moins d'encours dans un environnement plein de variabilités et avec saisonnalités. Ces résultats prouvent que DDMRP est capable de maintenir les stocks dans des niveaux avec moins de risque et d'anticiper les pics qualifiés (Miclo et al 2016).

Dans l'article publié en 2015, les auteurs ont comparé 3 scénarios : un premier modèle de simulation de MRPII, un deuxième modèle de DDMRP et un troisième modèle de DDMRP avec une augmentation de la zone verte (variation du facteur du lead time). Le but de cette variation était d'étudier l'effet de l'augmentation des lots de fabrication en DDMRP afin de diminuer les temps de mise en course des machines « setup time ». En comparant les résultats du premier et ceux du deuxième modèle, les auteurs ont constaté que le pourcentage des commandes livrées à temps du DDMRP était inférieur à celui du MRPII. Cependant, les encours de MRPII ont été plus élevés que ceux du DDMRP.

Également, les résultats du troisième modèle ont été comparés à ceux du deuxième modèle. En effet, le pourcentage des commandes livrées à temps du troisième modèle est inférieur à celui du deuxième modèle. De plus, les encours du troisième modèle sont plus élevés que ceux du deuxième modèle. De ce fait, les auteurs ont conclu que toute modification du facteur du lead time, ou du facteur de la variabilité peut dégrader les résultats (les pourcentages des commandes livrées à temps et les stocks encours) (Miclo et al 2015).

Il est vrai que les résultats trouvés ont été intéressants surtout pour le premier essai de comparaison entre MRP II et DDMRP. Cependant, le cas étudié était simple (nombre limité de ressources) et l'horizon de simulation était court (4 semaines). En outre, les demandes sont plus tôt stables (pas

de grandes variabilités), simples à prévoir et sans des pics qualifiés. Miclo (2015), dans sa thèse, a utilisé le même cas d'étude et pratiquement les mêmes indicateurs de performances.

En premier lieu, l'auteur a comparé les trois systèmes MRPII, Kanban et DDMRP. Les résultats trouvés montrent que MRPII, Kanban et DDMRP ont à peu près les mêmes indicateurs de performances lorsque l'environnement est stable (aucune source de variabilité). Dès que les variabilités apparaissent, le MRPII devient inefficace. Quant au Kanban et au DDMRP, les indicateurs de performances étaient semblables. Cependant, dans un environnement avec des saisonnalités, DDMRP était plus efficace (Miclo, 2015).

En revanche, le cas d'étude était simple et il ne reflète pas la réalité industrielle. En effet, les processus industriels utilisés dans la simulation étaient simples et le nombre de ressources était limité.

En deuxième lieu, l'auteur a essayé d'optimiser les tailles des buffers. À cet effet, la fonction objectif qu'il a utilisée consiste à maximiser le nombre de commandes livrées à temps et à minimiser les encours en utilisant deux différents algorithmes : l'algorithme génétique (métaheuristique) et l'algorithme business. Les variables à contrôler étaient les zones des buffers. À travers cette optimisation, l'auteur a conclu que l'ajustement des tailles de buffers est capable d'améliorer les indicateurs de performances choisis. De plus, les résultats trouvés montrent qu'une variation mineure des zones des buffers peut engendrer de grandes différences au niveau des indicateurs de performance. De plus, l'algorithme business a donné des résultats meilleurs et il était plus rapides que l'algorithme génétique (Miclo, 2015).

Cependant, l'optimisation utilise le lead time comme étant une variable de contrôle. En effet, le lead time est une fonction de plusieurs variables (état de l'atelier, caractéristique du produit, nombre de ressources, méthode de gestion). De plus, l'optimisation est basée sur le positionnement stratégique des buffers déjà fait dans la première partie. De ce fait, tout changement au positionnement stratégique des buffers peut engendrer, également, des grandes modifications.

Dans la dernière partie, Miclo a fait une simulation de l'intégration du DDMRP avec le MRPII chez une entreprise réelle ainsi qu'une optimisation des tailles des buffers comme il est décrit ci-dessus. Ainsi, l'auteur a remarqué une amélioration des indicateurs de performance pour les deux cas (Miclo, 2015).

Jiang et Rim (2016) ont étudié le positionnement stratégique de l'inventaire dans une nomenclature avec plusieurs parents en utilisant le ASRT. La stratégie du cas d'étude simulé était Make-To-Order. Dans leurs expériences, les auteurs ont utilisé l'algorithme génétique. La fonction objectif consistait à minimiser des coûts d'inventaire et les variables binaires indiquaient si l'article devait avoir un tampon ( $X_i = 1$ ) ou non ( $X_i = 0$ ) pour tous articles dans la nomenclature (Jinag et Rim, 2016).

À travers leur article publié en 2016, les auteurs ont montré l'efficacité de leur modèle mathématique à déterminer le positionnement stratégique de l'inventaire dans une nomenclature avec plusieurs parents à un lead Time donnée (Jiang et Rim, 2016). Il est vrai que leurs contributions étaient intéressantes. Cependant, une simulation pour confirmer ces résultats est requise. En effet, les niveaux de stocks ne sont pas statiques au cours du fonctionnement du DDMRP. En outre, étant donné que l'objectif de l'entreprise est de livrer aux clients les bons produits, au bon moment et au moindre coût, il serait plutôt intéressant d'étudier l'effet du positionnement stratégique des stocks pour augmenter le pourcentage des commandes livrées à temps en minimisant les niveaux de stocks.

Baptiste (2018) s'est intéressé à l'ordonnancement des différentes catégories de produits (produits gérés sur buffer, produits gérés sur commande MTO). Par conséquent, il a conclu que les produits gérés sur buffers DDMRP semblent être les plus faciles à ordonnancer. Quant à produits gérés par MTO, ils ont moins de visibilité (Baptiste, 2018).

Cuadra (2017) a fait une étude bibliographique dans son mémoire de maîtrise. L'auteur a bien développé et a bien expliqué les concepts du DDMRP. Cependant, son mémoire était fait en espagnol et il est basé uniquement sur les notions théoriques admises par Ptak et Smith (Cuadra, 2017).

Également, d'autres travaux scientifiques comme des mémoires de maîtrise, des thèses et des articles sont publiés en chinois ou en coréen. Mais jusqu'à présent, cette littérature n'a pas été traduite.

## 2.3 Revue critique

Bien que l'approche DDMRP soit basée sur des faits solides, beaucoup de notions restent implicites. En effet, il est dit dans les ouvrages de Ptak et Smith (2011 et 2016) que ces notions

sont connues à travers l'expérience de l'entreprise. Par exemple jusqu'à la publication de ce mémoire, rien n'est clair sur comment caractériser un lead time (long, moyen ou court) ou comment caractériser la variabilité (élevée, moyenne ou basse). De plus, dans le calcul des zones (voir le tableau 2.1), il est dit par exemple que si le lead time est court alors la zone rouge base est égale à 61%-100% ADU\* LDT. Bien que cette plage paraisse grande, Ptak et Smith ont affirmé que le pourcentage à choisir est propre à chaque entreprise voire à chaque produit. Mais, d'une façon générale, ils ont utilisé la médiane (soit 80% pour cet exemple) (Ptak et Smith, 2016).

Ces petits détails comme le choix du facteur du lead time, le choix du facteur de la variabilité et le choix du pourcentage peuvent changer énormément les résultats tel que mentionné dans Miclo et al (2015).

D'autres part, l'ajustement des buffers se fait principalement en tenant compte de la consommation moyenne par jour (l'ADU). Cependant, l'ajustement ne tient pas en compte des changements des leads time. En effet, une des principales défaillances du MRP était l'hypothèse que le lead time d'un produit est constant, ce qui n'est pas vrai. En effet, le lead Time est une fonction complexe et difficile à prévoir. Il dépend de plusieurs facteurs comme la charge de l'atelier, le nombre de ressources humaines, la maintenance des machines, les caractéristiques de l'ordre de fabrication, etc.

En outre, d'autres promesses du DDMRP ne sont pas encore évaluées comme l'efficacité du DDMRP à gérer les ressources humaines flexibles et l'amélioration des transmissions des flux de production. À cet effet, l'ERP reste, pour certaines entreprises, le noyau fondamental de la gestion de la production puisqu'il est capable d'intégrer une gestion plutôt globale (ressource, finance, achat, production, marketing, etc.).

D'autre part, dans la littérature, DDMRP a été comparé soit à MRPII, soit à Kanban. Beaucoup de cas d'étude montrent la capacité de DDMRP à résister efficacement contre la variabilité de l'environnement et à maintenir les stocks à un niveau optimal mieux que les systèmes MRPII et Kanban. Cependant, cette littérature reste limitée. En somme, la majorité des cas étudiés dans les projets académiques sont des cas d'étude simples qui ne reflètent pas totalement la réalité. En effet, dans un environnement manufacturier, les nomenclatures sont plus complexes et se chevauchent entre elles. De plus, les processus industriels sont complexes et le nombre des produits finis et des semi-finis est beaucoup plus élevé. Par conséquent, leur gestion est difficile.

Ainsi, ce mémoire de maîtrise consiste comparer DDMRP et le système EOQ à travers la simulation à événement. À cet effet, le chapitre suivant vise à définir la méthodologie utilisée dans ce projet.

## **2.4 Conclusion**

Ce chapitre était une présentation de la revue de littérature développée autour DDMRP. En premier lieu, les différentes étapes du DDMRP ont été expliquées. En deuxième lieu, une synthèse critique de la littérature a été développée. L'analyse de la littérature a permis de mettre la lumière sur les lacunes des projets académiques. En effet, tous les projets académiques ont étudié des cas simples avec peu d'opérations industrielles ou peu de produits finis et semi-finis. Par conséquent, nous pouvons introduire notre objectif de recherche. Il s'agit de comparer EOQ et DDMRP dans un cas d'étude complexe (27 produits finis et 36 produits semi-finis et 13 postes de travail).

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre vise à introduire la méthodologie de recherche utilisée dans ce projet. Tout d'abord, les questions de recherche sont développées. Puis, les étapes de la méthodologie de la recherche sont présentées.

### 3.1 Questions de recherche

En se basant sur les lacunes de la littérature présentées dans le chapitre précédent, on peut énoncer la question de recherche générale suivante :

- *Est-ce que DDMRP gère la production (déclenchement des ordres de fabrication) et les stocks mieux que EOQ ?*

Répondre à cette question revient à répondre aux sous-questions suivantes :

- *Comment les systèmes DDMRP et EOQ sont modélisés ?*
- *Quels sont les indicateurs de performances à suivre ?*
- *Quel est le modèle le plus performant face aux variabilités des demandes ?*

À travers ces questions, les promesses de DDMRP suivantes, décrites par Ptak et Smith dans leurs ouvrages (2011 et 2016), sont mises en relief :

- 1: DDMRP aide à absorber l'amplification de la demande (l'effet de fouet);
- 2: DDMRP garde les inventaires dans des meilleurs états;
- 3: DDMRP est capable de résister contre les variabilités de la demande;
- 4: DDMRP garantit la satisfaction des clients.

### 3.2 Méthodologie de recherche

Durant ce projet de recherche, nous avons procédé par la méthodologie de recherche présentée ci-dessous. Elle comporte principalement six phases.

#### 3.2.1 Phase 1 : Définir le problème et décrire le modèle conceptuel

La première phase vise à introduire l'entreprise et à mettre le lecteur dans le contexte. Ainsi, elle consiste, en premier lieu, à définir le problème (le système à simuler et son environnement). En

deuxième lieu, elle consiste à définir le modèle conceptuel. Autrement dit, elle sert à collecter des informations concernant l'entreprise, ses différents ateliers et leurs processus de fabrication. Ainsi, dans cette phase nous utilisons les méthodes de collecte d'informations suivantes : l'observation (des vidéos documentaires), la recherche bibliographique, les cinq pourquoi, les qui fait quoi, etc...

### 3.2.2 Phase 2 : Modéliser le système

La deuxième phase sert à modéliser le système. Elle comporte principalement deux étapes. La première étape vise à formuler les différentes hypothèses et à déterminer les entrées des modèles. Finalement, la dernière partie vise à construire les modèles.

**Justification de l'utilisation d'une Simulation à Évènements Discrets** : étant donné que la comparaison de DDMRP et de EOQ est basée sur des indicateurs de performance, il est nécessaire d'aboutir à des discussions qui reposent sur des valeurs numériques. Ainsi, la simulation, a priori, est l'outil le plus adapté à notre étude. En effet, la simulation consiste à imiter le fonctionnement d'un système complexe de production, d'une installation, d'un processus, usuellement par ordinateur, dans le but d'évaluer son comportement et de mesurer sa performance. Il s'agit de reproduire le comportement externe observable de l'environnement et ses mécanismes internes (Rossetti, 2015).

En outre, la simulation est un outil d'aide à la décision qui permet de mesurer la performance de l'état actuel du système et de réaliser certaines expériences généralement dans quelques minutes. Par conséquent, elle permet d'éviter les coûts de l'implémentation réelle des expériences.

Pour simuler un système, il existe principalement quatre techniques : la simulation Monte-Carlo, la simulation à événements discrets, la dynamique des systèmes et la simulation à base d'agents.

La simulation Monte-Carlo est une technique statique/stochastique. Elle est plutôt appropriée pour les modèles statiques (le facteur temps n'intervient pas). Quant à la dynamique des systèmes, c'est une technique de simulation d'un modèle mathématique permettant de comprendre et d'analyser des problèmes complexes. Elle consiste à résoudre les équations mathématiques pour obtenir la valeur de chaque variable au cours du temps. De ce fait, elle n'est pas convenable pour notre cas. Également pour la simulation à base d'agents, elle est adaptée généralement pour les systèmes dans lesquels il y a plusieurs acteurs qui interagissent entre eux (Kossar, 2017).

Finalement, la simulation à événements discrets est une technique dynamique/stochastique où chaque événement arrive à un instant donné et modifie l'état du système. Elle paraît être la mieux

adaptée à notre cas. En effet, la simulation à événements discrets est une technique classique et elle est la plus utilisée en recherche opérationnelle pour simuler les systèmes complexes comme les environnements manufacturiers, les services hospitaliers, les systèmes de transport, etc., et leurs évolutions dans le temps. Grâce à la SED, l'utilisateur est capable d'avoir une vision globale de tout ce qui est dans son modèle à tout instant. La SED permet également d'avoir facilement les indicateurs de performance désirés (Hollocks, 2005).

Ainsi, la simulation à événements discrets est un bon choix à notre cas. À cet effet, nous allons utiliser dans ce projet le logiciel de simulation « Arena simulation software » puisqu'il peut communiquer (lire et écrire) avec les autres logiciels de « Microsoft » comme « Excel » et « Access ». D'autre part, il offre la possibilité de développer des algorithmes spécifiques, si c'est nécessaire, à travers un module « Visual Basic ».

### 3.2.3 Phase 3 : Vérification et validation des modèles

La vérification et la validation des deux modèles sont deux étapes importantes puisqu'elles assurent la qualité du modèle et de la crédibilité des résultats obtenus. Dans cette phase, nous allons utiliser plusieurs techniques de vérification et de validation.

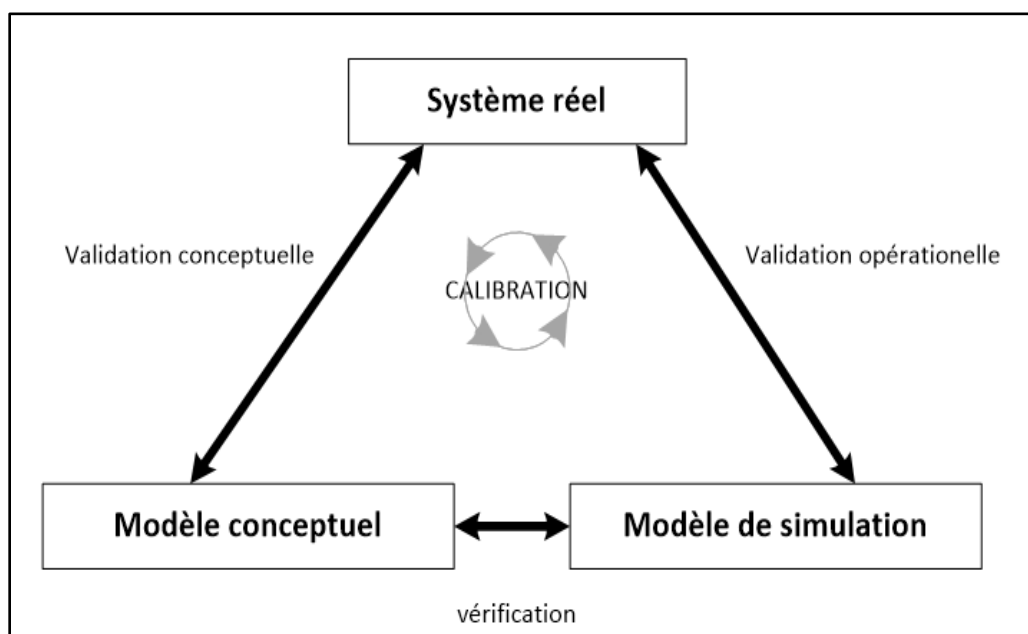


Figure 3.1 : Cycle de vérification du modèle de simulation (kossar, 2017)

Techniquement, il existe plusieurs méthodes pour vérifier et valider les modèles de simulations. Dans le cadre de ce mémoire, nous allons utiliser : la validation par l'animation, la validation par les tests des certaines conditions extrêmes, la validation par les tests dégénérés, et la validation par les tests de validité interne.

### **3.2.4 Phase 4 : Fixer le plan d'expériences et déterminer les indicateurs de performance**

La première étape de cette phase consiste à fixer le plan d'expérience. « *Un plan d'expériences est une série d'expériences et de tests.* » (Telford, 2007).

Étant donné que le but de ce projet est de comparer les deux modèles DDMRP et EOQ dans différents environnements, nous fixons le plan d'expériences défini par les expériences suivantes :

- 1<sup>ère</sup> expérience : la charge moyenne est constante par semaine et la quantité commandée pour chaque produit est constante. En effet, le scénario représente un environnement parfait (aucune source de variabilité) ;
- 2<sup>ème</sup> expérience : la charge moyenne est constante et la quantité commandée et la fréquence pour chaque produit est variable. À travers ce type de variabilité, ce scénario représente un environnement semi-parfait (deux sources de variabilité) ;
- 3<sup>ème</sup> expérience : la charge moyenne varie entre 70% et 110% alors que la quantité commandée pour chaque produit et sa fréquence de commande sont variables. Ainsi, ce scénario, avec des sources de variabilités, représente l'environnement de nos jours ;
- 4<sup>ème</sup> expérience : la charge moyenne est constante avec des saisonnalités pour certains produits à chaque période. Ce scénario reflète un environnement avec saisonnalité.

**Justification du choix des expériences :** Ces différentes expériences reflètent différents environnements. De la première expérience à la troisième, nous partons d'un environnement totalement parfait (aucune source de variabilité) vers un environnement instable et fortement variable. Ce dernier environnement représente à un certain niveau l'environnement industriel de nos jours (une variabilité du système « charge moyenne dans les ateliers » et une variabilité extérieure « quantité commandée et la fréquence de commande de chaque produit »). Quant à la

quatrième expérience, elle vise comparer les deux modèles dans un environnement avec saisonnalité.

Ainsi, à travers ces différentes expériences, nous pouvons tester pratiquement tous environnements. De ce fait, l'étude faite dans ce projet de recherche sera globale.

La deuxième étape de cette phase consiste à déterminer les indicateurs de performance à suivre. Étant donné que la simulation est faite dans un environnement de fabrication sur commande MTS « Make To Stock », nous fixons certains indicateurs de performances qui lui sont appropriés. Ces indicateurs sont principalement liés à la satisfaction des clients, aux stocks, à la finance et aux délais.

#### - Indicateurs liés à la satisfaction des clients

Les indicateurs permettent de mesurer la satisfaction des clients externes (demandes des produits finis) et des clients internes (demande des semi-finis entre les ateliers). Ils peuvent être définis principalement en deux indicateurs :

- Le pourcentage de commandes qui sont satisfaites directement (sans aucun délai) des stocks des produits d'un atelier;
- La durée d'attente moyenne des commandes qui ne sont pas satisfaites directement des stocks des produits d'un atelier.

#### - Indicateurs liés aux stocks

Les indicateurs liés aux stocks nous renseignent sur l'état des stocks de l'entreprise. Il s'agit de trois indicateurs. Soit le taux de rotation des stocks, le taux de couverture des stocks critiques et le niveau du stock. Ces indicateurs sont expliqués ci-dessous :

- Taux de rotations des stocks : cet indicateur permet à la fois d'évaluer la performance de la production et de la force commerciale. Il est calculé en utilisant la formule suivante : Chiffre d'affaires / stock moyen;
- Taux de couvertures de stocks critiques : cet indicateur est exprimé en jour et il montre pendant combien de jours les stocks (composants, matières premières, produits semi-finis) peuvent couvrir les demandes;

- Niveaux des Stocks : la somme des différents produits (produits finis, ou semi-finis) dans les ateliers.

- Indicateurs liés à la finance

Les indicateurs liés à la finance peuvent être résumés dans le fonds de roulement « WC : Working capital ». Il est défini comme l'excédent de capitaux stables, par rapport aux emplois durables, utilisé pour financer une partie des actifs circulants. Mathématiquement, nous pouvons écrire :

$FR = \text{Valeurs des stocks et des encours de chaque atelier} + \text{Créances des clients} - \text{Dettes fournisseurs}$

Étant donné que dans ce projet nous ne tenons pas en compte les créances clients et les dettes fournisseurs, nous pouvons calculer le fonds de roulement comme étant la somme des valeurs des stocks et des en cours de chaque atelier.

- Indicateur lié aux délais

Dans cette catégorie, nous suivons le lead time moyen. Il s'agit d'un indicateur exprimé en jour et qui représente le lead Time moyen dans chaque atelier. Techniquement, c'est le temps entre la commande et la livraison du produit ou du service.

### **3.2.5 Phase 5 : expérimenter et interpréter**

Cette phase vise principalement à comparer les différents indicateurs de performance, définis dans la partie précédente. Elle se compose de trois étapes.

La première étape consiste à réaliser les quatre expériences pour chaque modèle. Dans cette étape, pour chacune de ces expériences, nous créerons dix scénarios dans lesquelles les facteurs variables seront générés aléatoirement. Pour les expériences dont les facteurs sont constants, un seul scénario suffit puis qu'il n'a rien à varier.

Les scénarios sont créés à partir d'une macro (VBA). Cette macro est capable de modifier aléatoirement les facteurs tout en tenant compte des caractéristiques des scénarios. Par exemple, pour la deuxième expérience, la macro crée dix scénarios dont la quantité commandée par produit et leurs fréquences sont aléatoires (elles varient d'un scénario à un autre) tout en gardant la charge moyenne à 82.50 % par semaine (constante dans tous les scénarios). De plus, pour chacun de ces scénarios, les paramètres initiaux de la méthode EOQ (le point de commande et la quantité économique commandée) et du DDMRP (les dimensions des buffers, les facteurs des variabilités

de la demande et les facteurs des lead-time) sont calculés. Finalement chacun de ces scénarios est enregistré dans un fichier « Excel ».

De plus, un nombre de répliques de dix est choisi pour chacun de ces scénarios (géré automatiquement par le logiciel « Aréna Software » pour éliminer la variation interne du modèle (les lois des temps de traitement).

La deuxième partie consiste à mesurer les indicateurs de performances. Ces indicateurs peuvent être mesurés directement à partir des rapports générés automatiquement par « Arena Software » ou par ses différents blocs « ReadWrite ». Aussi, ils peuvent être calculés à travers d'autres indicateurs. Ainsi, les indicateurs de performance calculés présentent la moyenne arithmétique de tous les scénarios exécutés de la même expérience.

Finalement, la troisième étape consiste à comparer et interpréter les différents résultats. Elle sert également à justifier, si c'est nécessaire, les résultats trouvés.

### **3.2.6 Phase 6 : conclusion et recommandation**

Méthodiquement, il s'agit d'une phase récapitulative. En premier lieu, elle sert à faire des conclusions concernant le comportement de DDMRP et d'EOQ dans les différentes expériences. En deuxième lieu, elle sert à présenter les limites de nos modèles de simulation et à proposer les différentes recommandations pour les futures recherches dans le même domaine.

## **3.3 Conclusion**

Ce chapitre visait à présenter la méthodologie de notre projet de recherche et ses différentes phases. Dans la suite de ce mémoire, nous allons voir tout les étapes de notre méthodologie de recherche appliqués à un cas d'étude que nous allons le définir dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 4 MODÉLISATION DU SYSTÈME

Ce chapitre porte principalement sur la première phase « Définir le problème et décrire le modèle conceptuel » et la deuxième phase « Modéliser le système » de notre méthodologie de recherche. Ainsi, dans un premier lieu, nous allons voir les différents blocs des modèles. En deuxième lieu, nous nous concentrons sur la logique de la modélisation des deux modèles DDMRP et EOQ. Finalement, la dernière partie présente les techniques de vérification et de validation utilisées dans notre projet.

### 4.1 Présentation du modèle conceptuel

Cette partie vise à décrire le modèle conceptuel. Elle comporte une brève présentation de l'entreprise et ses produits finis ainsi qu'une description des différents ateliers et leurs postes.

#### 4.1.1 Présentation de l'entreprise

La troisième étape consiste à concevoir le modèle conceptuel. Notre étude de cas porte sur une entreprise fictive spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation des roues en aluminium de bicyclette. Ses opérateurs sont polyvalents. Chaque atelier dispose d'un certain nombre d'opérateurs qui sont affectés selon une règle de priorité. L'usine comporte trois ateliers : l'atelier de transformation, l'atelier de perçage et l'atelier d'assemblage. La figure ci-dessous présente la configuration de l'usine.

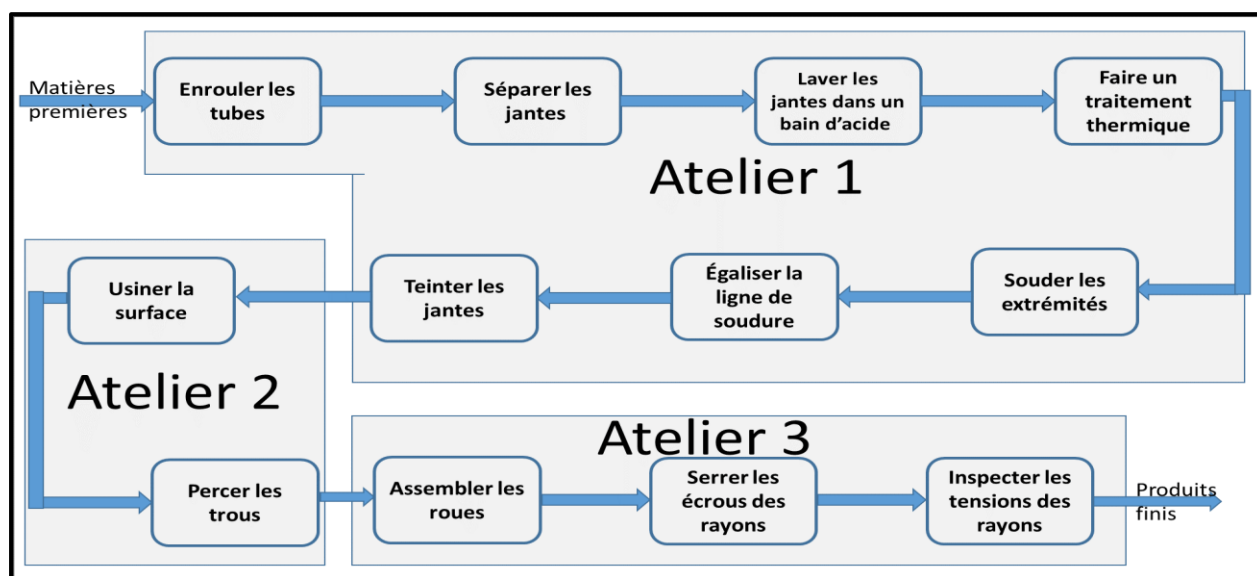


Figure 4.1 : Configuration de l'usine simulée

### 4.1.2 Description des produits fabriqués

Le produit fabriqué est une roue de bicyclette. La roue est constituée principalement d'une jante et un moyeu associés par l'intermédiaire des rayons. Les produits finis peuvent être classés en 27 types selon le profil du métal de la jante (profil 1, profil 2, profil 3), la couleur (blanche, grise, noire) et le nombre des rayons (32, 36, 40).

Ainsi, la nomenclature de la roue comporte trois niveaux et elle est présentée ci-dessous.

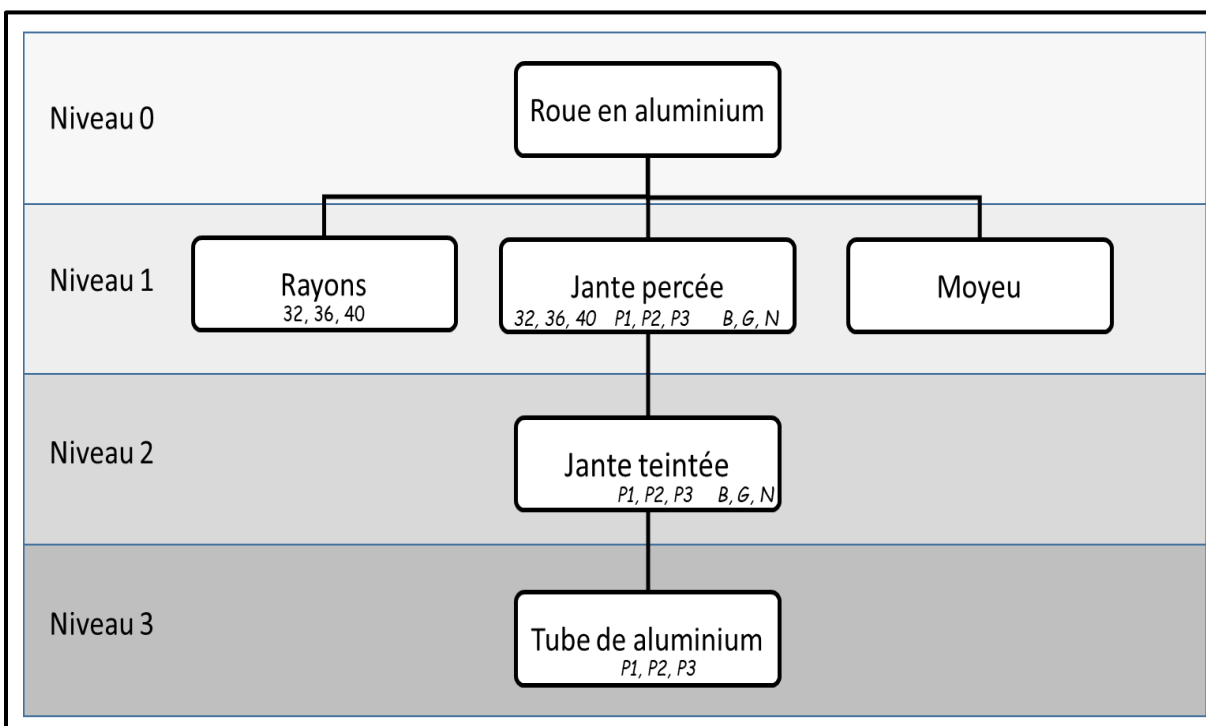


Figure 4.2 : Nomenclature générale d'une roue

L'entreprise décrite ci-dessus ne fabrique que les jantes. Le moyeu de la roue et les rayons sont achetés par l'entreprise. De ce fait, le traitement de ces derniers ne rentre pas dans notre cas d'étude. De plus, on assume que ces articles existent en grandes quantités de façon qu'il n'y a pas de rupture de leur stock au niveau du poste assemblages des jantes (voir la partie suivante).

Par ailleurs, cette entreprise est spécialisée dans la conception, la fabrication et la commercialisation des roues en aluminium de bicyclette. Ainsi, leurs différents processus de fabrication sont décrits ci-dessous.

### 4.1.3 Description des processus

L'usine simulée est spécialisée dans la fabrication des roues dont la nomenclature est présentée ci-dessus. Elle comporte trois ateliers : l'atelier de transformation, l'atelier de perçage et l'atelier d'assemblage.

#### 4.1.3.1 L'atelier de transformation

Dans l'atelier de transformation, le processus de fabrication commence par la réception de la matière première (tubes droits d'aluminium en trois profils) et il finit par l'obtention d'un produit semi-fini (une jante circulaire teintée). Ainsi, l'atelier est composé de sept postes de travail. Ils sont décrits ci-dessous.

- Le poste 101 : la fonction de ce poste consiste à enrouler les tubes d'aluminium. Elle est assurée par une machine « plieuse de métal » contrôlée par un opérateur.
- Le poste 102 : ce poste vise à séparer les tubes enroulés en utilisant une machine « dispositif de découpe » contrôlée par un opérateur.
- Le poste 103 : l'objectif de ce poste est de laver les jantes dans un bain d'acide afin d'éliminer les contaminants. Tout d'abord, les jantes sont collectées en lots de 22 et elles sont accrochées à une tige métallique. Puis, les jantes et la tige sont émergées par la suite dans la solution d'acide dans le bain. Finalement, ces jantes sont manuellement décrochées de la tige.
- Le poste 104 : la fonction de ce poste consiste à faire un traitement thermique aux jantes afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Pour cela, les jantes doivent rentrer dans un « four » dont la capacité est 88 jantes. Tout d'abord, les ouvriers accrochent les jantes dans des tiges dont chacune est de capacité de 22. Ensuite, un opérateur rentre toutes les jantes dans le four et initialise les variables de contrôles (température, temps de traitement nécessaire). Une fois tout est bien contrôlé, le traitement thermique commence. Après le traitement thermique, il les sort du four et contrôle leur état. Finalement, les ouvriers les décrochent de la tige.
- Le poste 105 : ce poste vise à souder les deux extrémités de la jante. Ce processus est semi-automatique. C'est-à-dire il est effectué par une machine « soudeuse » contrôlée par un opérateur.
- Le poste 106 : après la soudure, il est indispensable d'éliminer la trace de la soudure. Cette fonction est effectuée par un « dispositif de lisage » contrôlé par un opérateur.

- La poste 107 : la fonction de ce poste consiste à faire un traitement d'électrodéposition d'une teinte sur les jantes. Les ouvriers commencent tout d'abord par accrocher les jantes (capacité de 22) dans une tige. Par la suite, l'ensemble est immergé dans le bain. Une fois ce processus est fini, un ouvrier fait sortir les jantes et les décroche de la tige. Le bain de teinte peut contenir à la fois 4 lots dont la capacité de chacun est de 22 jantes.

Ainsi, les produits finaux de cet atelier sont classés dans les stocks en 9 produits selon le profil du métal utilisé et la couleur tentée.

#### **4.1.3.2 L'atelier de perçage**

Le processus de fabrication dans l'atelier de perçage commence par la réception des jantes circulaires teintées. Ces jantes subissent par la suite deux procédés industriels. Ainsi, cet atelier est composé de deux postes de travail. Il s'agit d'un poste d'usinage et un poste de perçage.

- Le poste 201 : la fonction de ce poste consiste à usiner la surface des jantes. Ce processus est semi-automatique et il est effectué par une machine « CNC » contrôlée par un opérateur.
- Le poste 202 : ce poste vise à percer les différentes jantes selon trois modes de perçage (32 trous, 36 trous, 40 trous). Cette fonction est assurée par une perceuse contrôlée par un opérateur.

En somme, de cet atelier, il résulte 27 produits semi-finaux, stockés selon le nombre de trous, la couleur et le profil du métal.

#### **4.1.3.3 L'atelier d'assemblage**

Le but de cet atelier est d'assembler les roues, les rayons et les moyeux afin d'obtenir un produit. Il est composé de quatre postes de travail. Ils sont décrits ci-dessous.

- Le poste 301 : il s'agit d'un poste dont la fonction est d'assembler les jantes et le moyeu à l'intermédiaire des rayons. Ce processus est manuel.
- Le poste 302 : à l'aide d'une clef de serrage, un opérateur, dans ce poste, serre les écrous des rayons.
- Le poste 303 : en utilisant une machine d'inspection numérique, un opérateur inspecte les tensions des roues.
- Le poste 304 : l'objectif de ce poste est de réajuster le serrage des écrous des rayons marqués comme non conformes. Ce processus de réajustement est manuel. De là, tous les produits qui en résultent sont conformes.

En somme, l'usine dispose de 3 types de matière première, fabrique 36 (27 de l'atelier 2 et 9 de l'atelier 2) produits semi-finis et fabrique et commercialise de 27 types de produits finis. Ces articles sont classés dans 63 différents stocks de façon que les ateliers soient indépendants les uns aux autres. De plus, chacun de ces ateliers dispose de ses propres machines (ressources matérielles) et ses propres ressources humaines qui peuvent être affectées à ses différents postes (les détails sont développés dans les parties suivantes). Le tableau dans l'annexe C présente les durées opératoires pour décrire les temps de traitement ces différentes postes.

Pour certains procédés de fabrication, il est indispensable de faire des réglages dus à un lancement de la production ou un changement des caractéristiques des lots de fabrication. Le temps de réglage est appelé « les temps de setup ». À ces différents temps de setup, des coûts appelés « les coûts de setup » sont associés. Les temps de setup sont présentés ci-dessous et leurs coûts sont présentés dans le chapitre suivant. Ils sont le résultat de l'addition des coûts des arrêts des machines et les coûts de l'opérateur qui exécute le setup. Le tableau dans l'annexe D présente les durées opératoires pour décrire les temps de traitement ces différentes postes.

## **4.2 Formuler les entrées et les hypothèses**

### **4.2.1 Formulation des entrées**

Dans notre modèle, les entrées seront modélisées par les entités qui parcourent les différents blocs dans le modèle. Les entités représentent les ordres de fabrication dont les attributs sont leurs différentes caractéristiques (taille du lot, priorité, profil du métal, couleur, nombre de trous, etc...). De même, les demandes sont représentées par des entités. Leurs attributs sont le numéro de la commande, la quantité commandée, le type demandé, le temps d'arrivée, etc.

Les ressources sont également représentées par entités puisqu'ils se déplacent dans un atelier librement pour arriver à un poste. La logique de circulation des ressources est présentée dans le chapitre suivant.

### **4.2.2 Formulation des hypothèses**

Étant donné que les systèmes à simuler sont très complexes, il est primordial d'effectuer certaines hypothèses afin de relaxer les problèmes et faciliter la modélisation. Ces hypothèses sont considérées par les deux modèles. Dans notre cas d'étude, nous retenons les suivantes :

- Au cours d'une année, seulement les samedis et les dimanches sont des jours fériés (arrêt de production).
- L'usine fabrique deux types de roues : une roue avant et une roue arrière. Cependant, dans cette étude, nous considérons seulement un seul type de roue. Soit la roue avant.
- Les matières premières comme les barres d'aluminium, les rayons et le moyeu sont disponibles en tout moment.
- Les déplacements des opérateurs d'un poste vers un autre dans le même atelier prennent 5 minutes indépendamment de la distance réelle entre les postes.
- Chacun des ateliers possède un nombre fixe de machine et d'opérateurs.
- Dans un même atelier, les opérateurs sont polyvalents, c'est-à-dire qu'ils peuvent changer de poste sans aucune perte d'efficacité.
- Les temps de déplacements des lots, dans un atelier ou d'un atelier vers un autre, ne sont pas considérés dans ce modèle.
- On assume que les machines sont fiables au cours de la période de simulation, c'est-à-dire aucune action de maintenance n'est effectuée.
- Les ressources matérielles et humaines sont efficaces au cours de la période de simulation.
- Avant chaque utilisation, le four doit être réchauffé. En effet, la durée de réchauffement est une fonction qui dépend de l'état du four.
- Le four et les bains de teinte et d'acide peuvent être utilisés pendant la durée de pause (entre 12 h et 13 h) si une activité est déjà lancée avant 12 h.
- Dans un atelier, tous les produits fabriqués sont supposés conformes.

### 4.3 Construction du modèle

Cette section vise à décrire les deux modèles. Ainsi, la première partie est une description des ateliers modélisés. La deuxième partie est une présentation du processus des inputs des modèles. Puis, la troisième partie est une description de la modélisation des demandes clients. Finalement, la dernière partie sert à décrire le processus de l'affectation des opérateurs.

### 4.3.1 Modélisation des ateliers

La modélisation des ateliers occupe la partie la plus importante dans le modèle puisque la valeur ajoutée de l'usine est créée dans ses blocs. Du point de vue modélisation, chacun des ateliers comprend les différents processus de fabrication décrits dans le chapitre précédent. La figure ci-dessous présente une capture d'écran du troisième atelier.

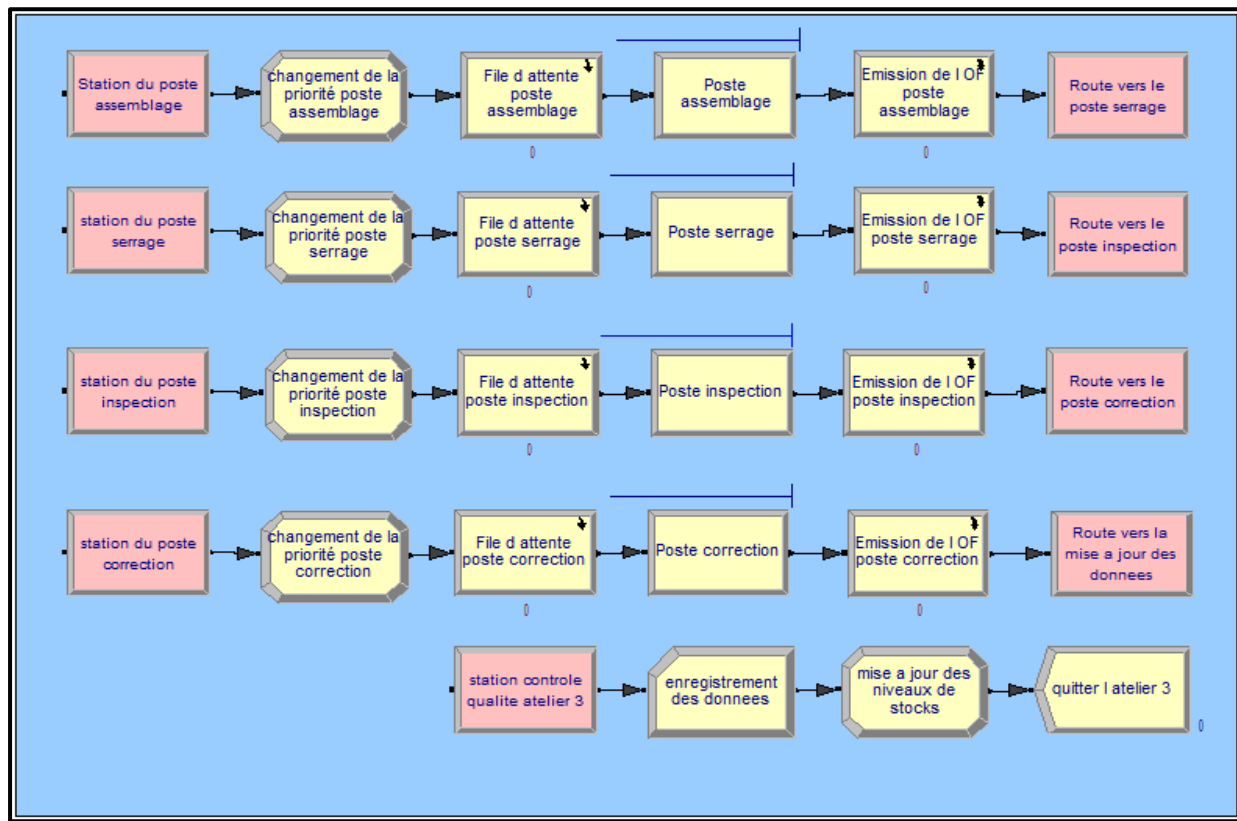


Figure 4.3 : Exemple de la modélisation des ateliers (troisième atelier)

Le processus de fabrication commence par la réception des ordres de fabrication par un bloc « Station ». Puis, la priorité de l'entité est ajustée à travers les blocs « Assign ». Une fois qu'un ordre de fabrication, représenté par une entité, a parcouru par toutes les opérations de l'atelier, l'enregistrement des données (comme le lead time) se fait à travers le bloc « Record ». Simultanément, les produits sont stockés, c'est-à-dire, les différents niveaux de stocks sont ajustés. Finalement, les entités passent par le bloc « dispose » et quittent le modèle.

Le premier atelier et le deuxième atelier sont modélisés avec la même logique.

### 4.3.2 Importation des données

Grâce aux blocs « ReadWrite », les données générées dans un scénario sont importées dans le modèle. Elles sont stockées dans des variables pour qu'elles soient utilisées ultérieurement. Les caractéristiques des demandes (le numéro de la demande, le type demandé, la quantité commandée, le temps d'arrivée) et les caractéristiques des modèles (paramètres de DDMRP ou de EOQ) constituent les données principales importées à partir d'un fichier Excel. Toutes ces données sont générées automatiquement lors de la création des demandes dans le fichier Excel.

Le mécanisme d'importation des données est présenté dans la figure suivante. Il s'agit d'une capture d'écran du modèle DDMRP.

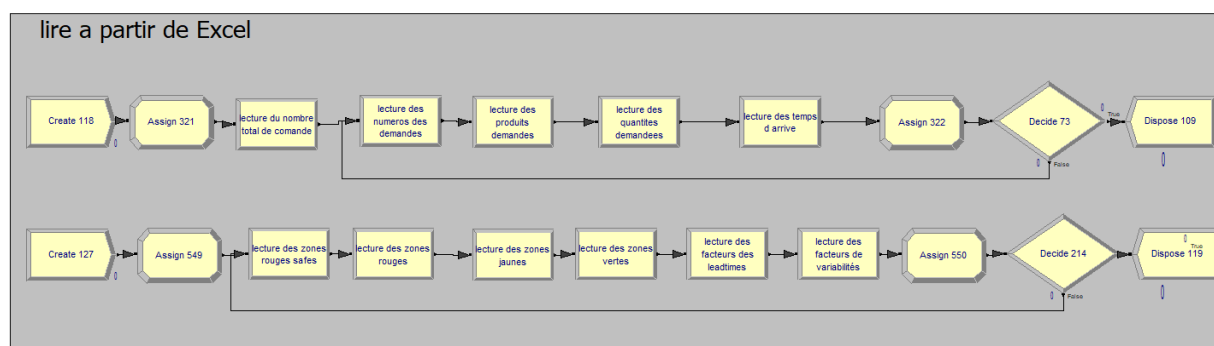


Figure 4.4 : Capture d'écran de l'importation des données

Dans le modèle EOQ, les blocs de lecture des zones et des facteurs des lead time et des variabilités sont simplement remplacés par des blocs de lecture des points de commande initiaux et des quantités économiques de commandes.

La lecture de donnée est un des processus qui commencent au début (à  $t$  égal à 0) puisque les données lues servent à assurer le fonctionnement du modèle pendant la période de réchauffement. Par la suite, ces caractéristiques sont calculées automatiquement par des mécanismes d'ajustement décrits dans la partie suivante.

Comme nous le voyons dans la figure précédente, l'importation des demandes est faite par des boucles. La condition d'arrêt de la première est l'atteinte du nombre de commandes lu à partir du premier bloc « ReadWrite » (le bloc « ReadWrite » avant la boucle).

### 4.3.3 Traitement des demandes des produits finis

Le traitement des demandes des produits finis comporte deux mécanismes. Soit la génération des demandes et leur satisfaction.

La génération des demandes consiste à créer les entités, qui représentent les demandeur des clients, à leurs temps d'arrivées. Ainsi, leurs attributs sont assignés. Ensuite, elles passent à un bloc « Decide » dans le but de vérifier si la demande peut être satisfaite directement (sans aucun délai d'attente). Selon le résultat de la vérification, deux options sont offertes. Si la demande est satisfaite directement, l'entité quitte le modèle définitivement après avoir enregistré les données. Sinon (le niveau de stocks est inférieur à la demande), l'entité est maintenue dans une file d'attente. Une fois que le niveau de stock de la demande est capable de répondre au besoin de la demande en question, l'entité est libérée et la demande est satisfaite.

Dans cette étude, les demandes clients ont les mêmes dates d'échéance (due date). Ainsi, ces demandes sont traitées par la règle PEPS premier entré premier servi (FIFO).

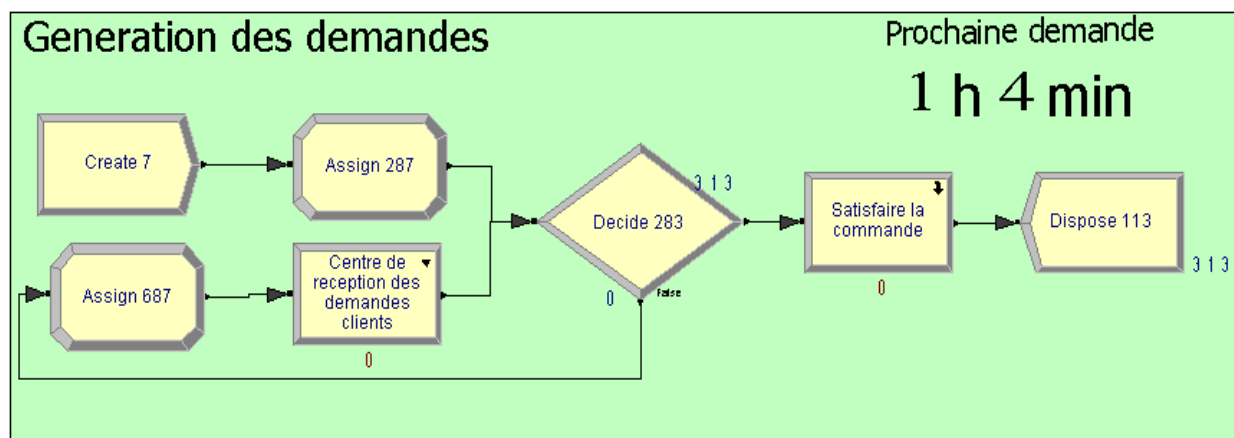


Figure 4.5 : Traitement des demandes des produits finis

La figure ci-dessus représente une capture d'écran du processus de génération des demandes des produits finis. En ce qui concerne le processus de traitement des commandes entre les ateliers, il est décrit dans les parties suivantes puisqu'il est spécifique à chaque modèle.

### 4.3.4 Processus d'affectation des opérateurs dans un atelier

Dans notre cas d'étude, les opérateurs sont polyvalents, c'est-à-dire, dans le même atelier, ils peuvent travailler à n'importe quel poste sans aucune perte d'efficacité. Par conséquent, ils sont

représentés par des entités. En effet, chacune porte un attribut qui spécifie chaque opérateur dans chaque atelier.

Le processus d'affectation des opérateurs commence par la création des entités dans chaque atelier qui représentent les opérateurs (le nombre d'entités dans un atelier est égal au nombre d'opérateurs dans le même atelier). Le processus d'affectation englobe deux parties comme le montre la figure suivante. La première partie consiste à vérifier les conditions d'affectation et elle se termine par le choix du poste (une décision à prendre). Quant à la deuxième partie, elle consiste à affecter l'opérateur au poste choisi.

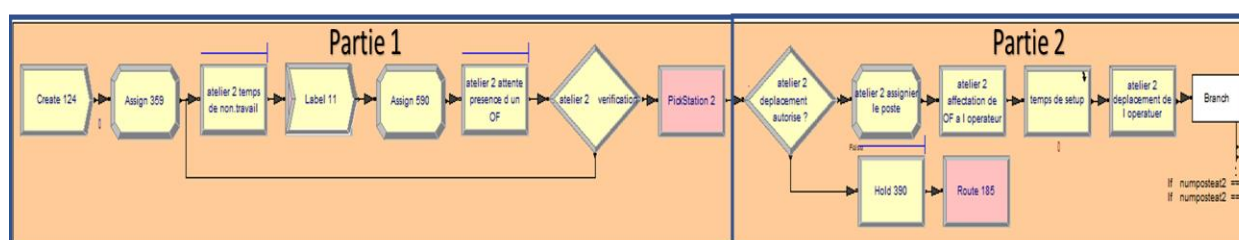


Figure 4.6 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs

Pendant les heures d'inactivité, les entités, qui représentent les opérateurs, sont maintenues dans un bloc « Hold ». Elles sont libérées pendant les heures de travail (du lundi au vendredi de 8h à 12h et de 13h à 17h). Ainsi, elles passent à un autre bloc « Hold ». Là, elles sont maintenues et elles sont libérées dans deux cas de figure. Le premier est la fusion (condition « et ») de deux conditions. Soit la présence d'un ordre de fabrication dans un poste de l'atelier et la disponibilité d'une des machines de ce poste (seulement dans le cas d'un procédé automatique ou semi-automatique). Le deuxième cas de figure se présente lors du temps d'inactivité.

Ensuite, ces entités doivent passer par un bloc conditionnel « Decide ». Ainsi, le résultat dépend des deux cas de figure précédemment décrits. Si le deuxième cas de figure se présente alors les entités sont retournées vers le premier bloc « Hold ». En revanche, si le premier cas de figure se présente, alors les entités passent vers le bloc « Pick-Station ».

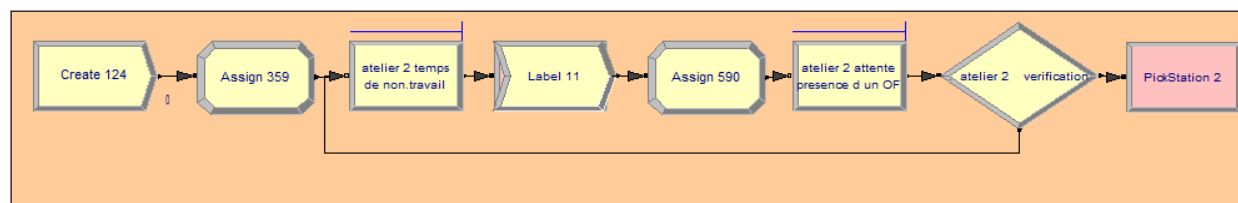


Figure 4.7 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs (partie 1)

Le bloc « Pick-Station » vise à choisir la destination de l'opérateur. En effet, le module sélectionne automatiquement la station selon une fonction qui dépend du modèle. Dans le modèle EOQ, cette fonction est égale au minimum des temps de présence des ordres de fabrication dans les postes de travail puisque leur traitement se fait selon la règle FIFO dans le même atelier. Cependant, elle est égale au minimum des priorités des ordres de fabrication dans les postes de travail, dans le modèle DDMRP puisque leur traitement se fait selon leur priorité (dans le même atelier).

En somme, l'entité quitte la première partie seulement si toutes ces conditions sont satisfaites :

- ✓ L'opérateur est pendant son temps de travail ;
- ✓ Un lot de fabrication est présent dans n'importe quel poste de l'atelier ;
- ✓ Une machine est disponible au poste où le lot est présent (dans le cas d'un procédé automatique ou semi-automatique) ;
- ✓ La destination est attribuée.

Une fois que l'entité a quitté la première partie, elle passe vers la deuxième partie où un autre traitement se déroule. Il commence par une simple vérification qui consiste à vérifier si le déplacement est utile ou inutile. On dit qu'un déplacement est utile s'il se fait cinq minutes avant la fin de la période de travail, c'est-à-dire s'il se fait avant 11h:55 min ou avant 16h:55 min. Dans le cas où le déplacement est inutile, l'entité se repose dans un bloc « Hold » pendant cinq minutes puis elle est retournée vers le premier bloc « Hold » de la deuxième partie.

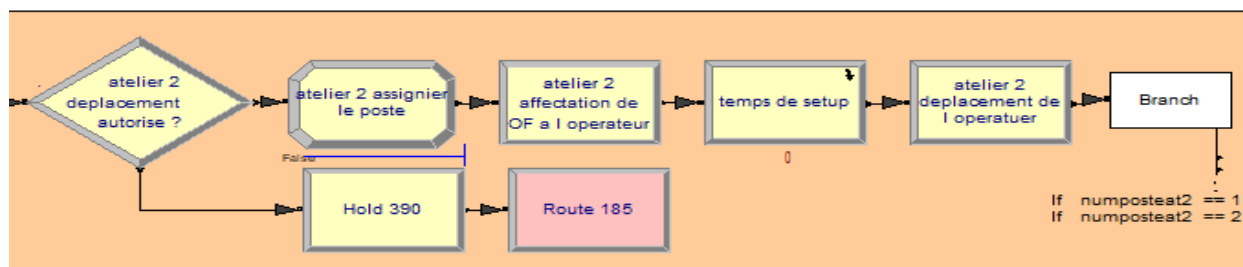


Figure 4.8 : Capture d'écran du processus d'affectation des opérateurs (partie 2)

Le déplacement utile donne aux entités l'accès vers le bloc « Assign » auquel les caractéristiques du lot de fabrication sont attribuées. Ainsi, l'entité donne le signal « S01 » au lot correspondant pour qu'il soit libéré de la file d'attente. Ensuite, l'opérateur doit réserver la machine puis il doit faire le réglage si nécessaire. En effet, l'opérateur vérifie si le réglage de l'une des machines correspondant aux caractéristiques du lot. Dans ce cas, cette machine est choisie et le temps de

setup vaut zéro. Finalement, le déplacement est exécuté. Ainsi, l'opérateur, désigné par l'entité, est réservé pendant cinq minutes.

Le processus d'affectation des opérateurs finit par le transfert de l'entité vers le poste désigné par le bloc « Pick Station », grâce au bloc « Branch ».

Simultanément, le lot, qui a reçu le signal « S01 », est libéré de la file d'attente. Ensuite, l'entité, qui désigne l'opérateur transféré au bloc « label », est fusionnée avec le lot de fabrication correspondant à travers le bloc « Batch » comme le montre la figure suivante.

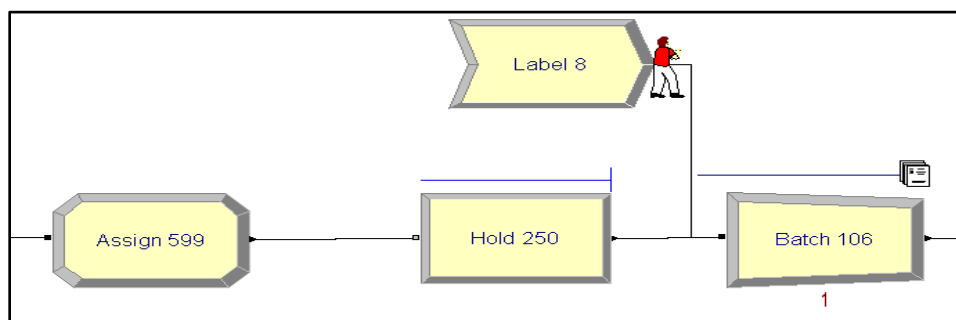


Figure 4.9 : Capture d'écran de la fusion de l'opérateur et le lot de fabrication

Lorsque le traitement du lot est terminé, la machine est libérée. L'opérateur et le lot de fabrication sont séparés. En effet le lot poursuit son cheminement. Quant à l'opérateur, il est renvoyé vers le processus d'affectation des opérateurs pour qu'une autre tâche lui soit confiée.

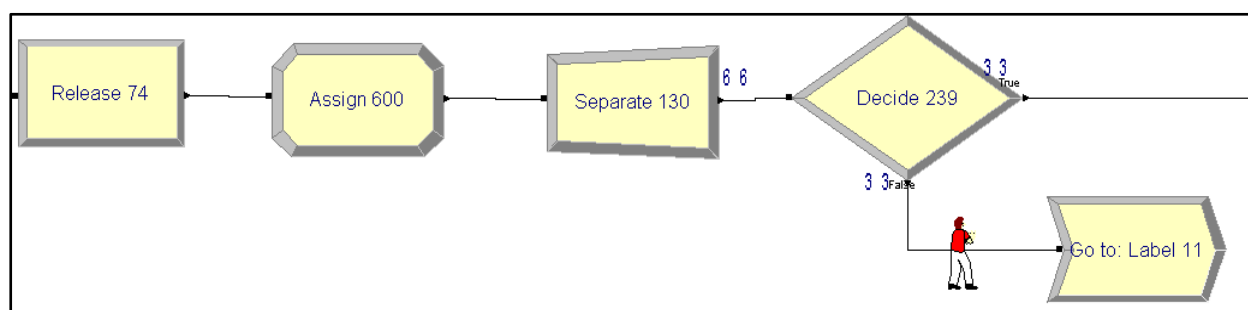


Figure 4.10 : Capture d'écran de la séparation de l'opérateur et le lot de fabrication

Le processus d'affectation des opérateurs est spécifique à chaque atelier puisque chacun dispose de ses propres opérateurs qu'ils gèrent en fonction de sa situation (comme il est décrit ci-haut). Ainsi, dans chaque modèle, il existe trois processus d'affectation spécifique à chacun des ateliers.

## 4.4 Construction du modèle utilisant EOQ

En plus de tout ce qui a été décrit dans la partie précédente (les ateliers modélisés, le processus d'importation des données, le processus de génération des demandes clients, le processus d'affectation des opérateurs), le modèle EOQ contient une partie spécifique. Cette partie sera décrite dans la suite. En effet, utiliser l'EOQ dans un atelier consiste en premier lieu à calculer le point de commande et la quantité économique de commande.

### 4.4.1 Point de commande

Le point de commande consiste à déterminer pour chaque article stocké le niveau de stock au-dessous duquel la commande est passée. Généralement, il se calcule en multipliant la consommation moyenne journalière (ADU) et le délai de livraison (DL).

$$PC = ADU \times DL \quad (6)$$

### 4.4.2 Quantité économique de commandes

La quantité économique de production est calculée à partir de la formule de Wilson dont la logique consiste à déterminer la taille du lot qui minimise les coûts d'achats, de lancement d'une commande et de stockage.

$$QEP = \sqrt{\frac{2 \times N \times CL}{C \times T}} \quad (7) \quad \text{où}$$

N = nombre total d'unités consommées par an ;

CL = coût de lancement d'une commande ;

T = taux de possession du stock ;

C = coût unitaire de l'article.

Ainsi, l'utilisation de cette formule relève la détermination du coût de lancement d'une commande.

Le coût de lancement d'une commande est calculé en utilisant la formule suivante.

Le coût de setup = coût des arrêts des machines + coût des opérateurs.

Les tableaux suivants détaillent les calculs des coûts dans les différents ateliers. Le salaire d'un opérateur est de 15\$/h.

Tableau 4.1 : Coût de set up dans le premier atelier

Atelier 1	Temps moyen set up (min)	Coût de la machine (\$)	Coût de la machine pendant l'arrêt (\$)	Coût de l'opérateur (\$)	Coût supplémentaire (\$)
Poste 101	7	60 000	0,34	1,75	0,00
Poste 102	5	50 000	0,20	1,25	0,00
Poste 103	****	*****	*****	0,00	0,00
Poste 104	25	80 000	1,60	0,00	60,00*
Poste 105	6	70 000	0,34	1,50	0,00
Poste 106	7	50 000	0,28	1,75	0,00
Poste 107	30	40 000	0,96	7,50	30,00**
Total			3,72	13,75	90,00
Total du coût set up dans le premier atelier					107,47

\*coût d'augmentation de la puissance du four

\*\*coût du changement de la solution du bain

Tableau 4.2 : Coût de set up dans l'atelier 2

Atelier 2	Temps moyen set up (min)	Coût de la machine (\$)	Coût de la machine pendant l'arrêt (\$)	Coût de l'opérateur (\$)	Coût supplémentaire (\$)
Poste 201	6	70 000	0,34	1,50	0,00
Poste 202	10	80 000	0,64	2,50	0,00
Total			0,98	4,00	0,00
Total du coût set up dans le deuxième atelier					4,98

Tableau 4.3 : Coût de set up dans l'atelier 3

Atelier 2	Temps moyen set up (min)	Coût de la machine (\$)	Coût de la machine pendant l'arrêt (\$)	Coût de l'opérateur (\$)	Coût supplémentaire (\$)
Poste 301	***	***	***	***	***
Poste 302	***	***	***	***	***
Poste 303	12	80 000	0,77	3,00	0,00
Poste 304	***	***	***	***	***
Total			0,77	3,00	0,00
Total du coût set up dans le troisième atelier					3,77

Les différents coûts des articles gérés par l'entreprise sont les suivants :

- ✓ Roue en jante teintée : 50\$ l'unité ;
- ✓ Jante teintée et percée : 30\$ l'unité ;
- ✓ Jante teintée : 15 \$ l'unité ;
- ✓ Barre d'aluminium brute : 30 \$ l'unité (peut produire 4 jantes).

Le tableau suivant montre le calcul des différents points de commande (PC) et les différentes quantités économiques de production (QEP) en fonction de la demande moyenne annuelle (DMA).

Tableau 4.4 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 3

Article	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5	PF 6	PF 7	PF 8	PF 9	PF 10	PF 11	PF 12	PF 13
DMA	2940	2195	2425	3225	1585	3080	1640	2060	1815	3425	1305	2340	1495
PC	42	31	35	46	23	44	23	29	26	49	19	33	21
QEP	30	26	27	31	22	30	22	25	23	32	20	27	21

Tableau 4.5 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 3 (suite)

Article	PF 14	PF 15	PF 16	PF 17	PF 18	PF 19	PF 20	PF 21	PF 22	PF 23	PF 24	PF 25	PF 26	PF 27
DMA	3295	3150	2200	2820	1145	1735	2735	1470	1570	2120	1530	3120	3135	1380
PC	47	45	31	40	16	25	39	21	22	30	22	45	45	20
QEP	32	31	26	29	19	23	29	21	22	25	21	31	31	20

Tableau 4.6 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 2

Article	SF 21	SF 22	SF 23	SF 24	SF 25	SF 26	SF 27	SF 28	SF 29	SF 210	SF 211	SF 212	SF 213
DMA	2940	2195	2425	3225	1585	3080	1640	2060	1815	3425	1305	2340	1495
PC	63	47	52	69	34	66	35	44	39	73	28	50	32
QEP	44	38	40	46	32	45	33	37	35	48	29	39	32

Tableau 4.7 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 2 (suite)

Article	SF 214	SF 215	SF 216	SF 217	SF 218	SF 219	SF 220	SF 221	SF 222	SF 223	SF 224	SF 225	SF 226	SF 227
DMA	3295	3150	2200	2820	1145	1735	2735	1470	1570	2120	1530	3120	3135	1380
PC	71	68	47	60	25	37	59	32	34	45	33	67	67	30
QEP	47	46	38	43	28	34	43	31	32	38	32	46	46	30

Tableau 4.8 : Calcul des caractéristiques de l'EOQ dans l'atelier 1

Article	SF 11	SF 12	SF 13	SF 14	SF 15	SF 16	SF 17	SF 18	SF 19
DMA	7560	7890	5515	7070	7940	6165	5940	5220	7635
PC	1080	1127	788	1010	1134	881	849	746	1091
QEP	736	752	629	712	754	665	652	499	740

Les paramètres calculés dans les tableaux précédents présentent un exemple de l'entrée du modèle EOQ. Ils servent à exécuter le modèle pendant la période de réchauffement. Ils sont réajustés automatiquement dans le modèle chaque an par un mécanisme de réajustement en fonction des autres données comme le montre la figure suivante.

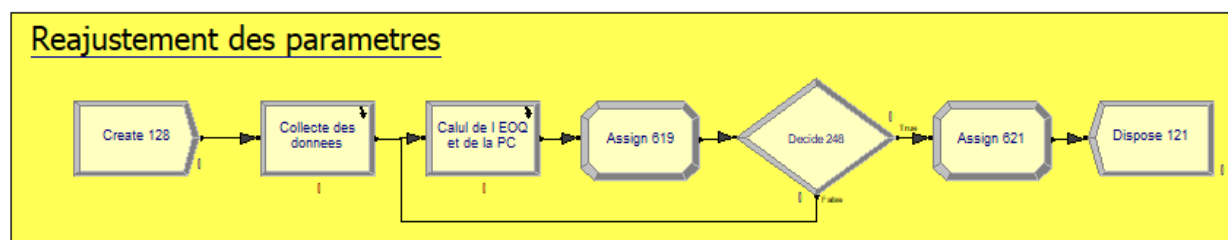


Figure 4.11 : Capture d'écran du processus de réajustement des paramètres

### 4.4.3 Génération des ordres de fabrications

La génération des ordres de fabrication est le processus moteur du modèle. Là, les besoins sont déterminés et la planification des ordres de fabrication est faite. En effet, le processus commence par la création d'une entité qui calcule les différents niveaux des stocks projetés. Ensuite, elle détermine les articles qui nécessitent des réapprovisionnements. Ainsi, les ordres de fabrication sont créés et déterminés. Finalement, pour fabriquer un lot, la dernière étape consiste à vérifier la disponibilité de la matière première des ateliers. En effet, si la matière première est disponible le lot de fabrication est lancé directement (sans aucun délai d'attente). Sinon, le lot est maintenu dans un bloc « Hold » (comme le montre l'annexe F).

Le processus de génération des ordres de fabrication se termine par l'envoi des lots de fabrication vers l'atelier correspondant. La figure ci-dessous présente une capture d'écran du processus de génération des ordres de fabrications.

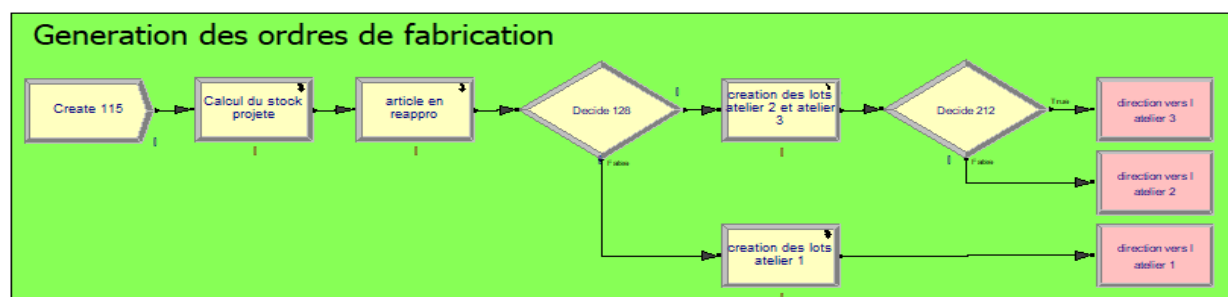


Figure 4.12 : Capture d'écran du processus de génération des OF dans le Module EOQ

Après avoir présenté le modèle EOQ et ses différents processus permettant de planifier la production et la génération des différents ordres de fabrication, il est intéressant maintenant de voir le modèle DDMRP et ses différents processus. C'est pourquoi la partie suivante vise à expliquer les différentes parties du modèle DDMRP.

## 4.5 Construction du modèle DDMRP

Dans cette partie, les cinq étapes de DDMRP, présentée dans le deuxième chapitre, sont décrites du point de vue modélisation. Ainsi, cette partie comporte les sous-parties suivantes : le positionnement stratégique des buffers, la détermination des profils des buffers, l'ajustement dynamique des buffers, la planification tirée par la demande et l'exécution visible et en collaboration.

### 4.5.1 Positionnement stratégique des buffers

Les buffers, dans notre cas d'étude, sont positionnés dans tous les niveaux de la nomenclature des jantes (sauf les rayons et les moyeux puisque ses articles existent avec une quantité illimitée) puisque la nomenclature comporte une seule branche.

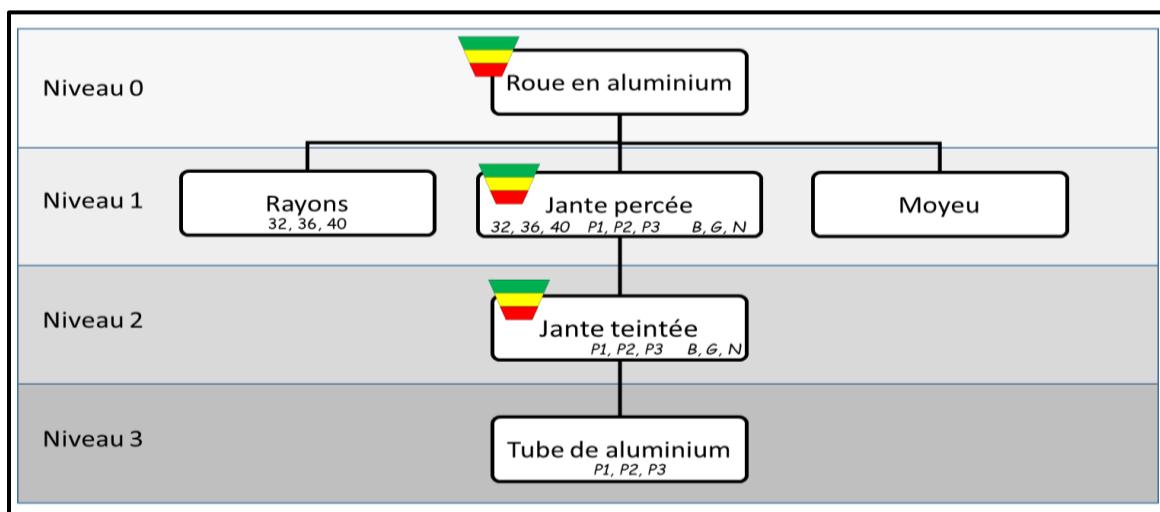


Figure 4.13 : Positionnement stratégique des buffers

### 4.5.2 Détermination des profils des buffers

La détermination des profils des buffers ou le calcul des zones rouge, jaune et verte est la deuxième étape du DDMRP. Pour notre cas d'étude, elle est détaillée dans les tableaux suivants.

Tableau 4.9 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 3

Article	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4	PF 5	PF 6	PF 7	PF 8	PF 9	PF 10	PF 11	PF 12	PF 13
ADU	10,5	7,84	8,66	11,5	5,66	11	5,86	7,36	6,48	12,2	4,66	8,36	5,34
V	34	26	28	37	22	36	22	25	23	40	20	27	21
Y	42	32	35	47	23	44	24	30	26	49	19	34	22
RB	34	26	28	37	22	36	22	25	23	40	20	27	21
RS	17	13	14	19	11	18	11	13	12	20	10	14	11
TB	127	97	105	140	78	134	79	93	84	149	69	102	75

(Facteur variabilité 0.5, facteur lead time 0.8, lead time 4 jours)

Tableau 4.10 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 3 (suite)

Article	PF 14	PF 15	PF 16	PF 17	PF 18	PF 19	PF 20	PF 21	PF 22	PF 23	PF 24	PF 25	PF 26	PF 27
ADU	11,8	11,3	7,86	10,1	4,09	6,2	9,77	5,25	5,61	7,57	5,46	11,1	11,2	4,93
V	38	36	26	33	19	23	32	21	22	25	21	36	36	20
Y	48	45	32	41	17	25	40	21	23	31	22	45	45	20
RB	38	36	26	33	19	23	32	21	22	25	21	36	36	20
RS	19	18	13	17	10	12	16	11	11	13	11	18	18	10
TB	143	135	97	124	65	83	120	74	78	94	75	135	135	70

(Facteur variabilité 0.5, facteur lead time 0.8, lead time 4 jours)

Tableau 4.11 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 2

Article	SF 21	SF 22	SF 23	SF 24	SF 25	SF 26	SF 27	SF 28	SF 29	SF 210	SF 211	SF 212	SF 213
ADU	10,3	7,7	8,51	11,3	5,56	10,8	5,75	7,23	6,37	12	4,58	8,21	5,25
V	51	38	42	56	32	53	33	37	35	59	29	41	32
Y	63	48	52	70	34	66	36	45	39	74	28	51	33
RB	51	38	42	56	32	53	33	37	35	59	29	41	32
RS	26	19	21	28	16	27	17	19	18	30	15	21	16
TB	191	143	157	210	114	199	119	138	127	222	101	154	113

(Facteur variabilité 0.5, facteur lead time 0.8, lead time 6 jours)

Tableau 4.12 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 2 (suite)

Article	SF 214	SF 215	SF 216	SF 217	SF 218	SF 219	SF 220	SF 221	SF 222	SF 223	SF 224	SF 225	SF 226	SF 227
ADU	11,6	11,1	7,72	9,89	4,02	6,09	9,6	5,16	5,51	7,44	5,37	10,9	11	4,84
V	57	54	38	49	28	34	47	31	32	38	32	54	54	30
Y	71	68	48	61	25	38	59	32	34	46	33	67	68	30
RB	57	54	38	49	28	34	47	31	32	38	32	54	54	30
RS	29	27	19	25	14	17	24	16	16	19	16	27	27	15
TB	214	203	143	184	95	123	177	110	114	141	113	202	203	105

(Facteur variabilité 0.5, facteur lead time 0.8, lead time 6 jours)

Tableau 4.13 : Calcul des paramètres de DDMRP atelier 1

Article	SF 11	SF 12	SF 13	SF 14	SF 15	SF 16	SF 17	SF 18	SF 19
ADU	27	28,2	19,7	25,3	28,4	22	21,2	18,6	27,3
V	648	677	473	606	681	529	510	448	655
Y	1080	1128	788	1010	1135	881	849	746	1091
RB	648	677	473	606	681	529	510	448	655
RS	324	339	237	303	341	265	255	224	328
TB	2700	2821	1971	2525	2838	2204	2124	1866	2729

(Facteur variabilité 0.5, facteur lead time 0.4, lead time 40 jours)

### 4.5.3 Ajustement dynamique des buffers

Dans DDMRP, l'ajustement des zones buffers se fait par l'une des méthodes suivantes : l'ajustement recalculé, l'ajustement planifié et l'ajustement manuel. Dans notre cas d'étude, nous allons utiliser l'ajustement recalculé basé sur l'ADU. Il est exécuté par un mécanisme d'ajustement des buffers.

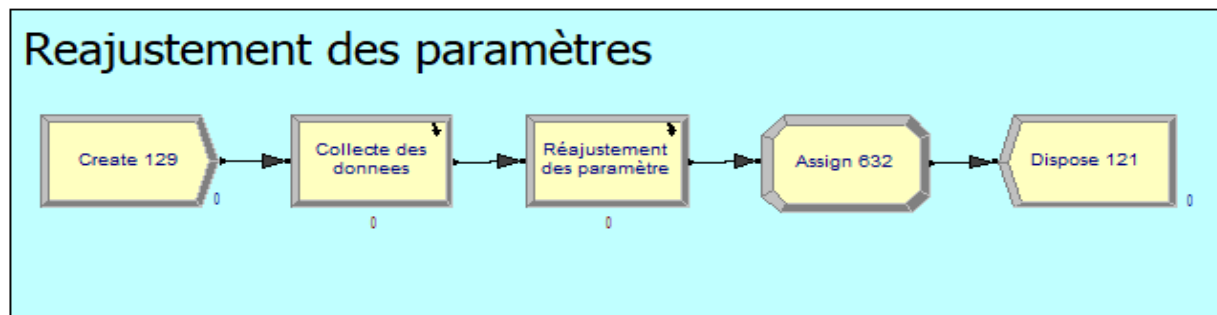


Figure 4.14 : Capture d'écran du mécanisme de réajustement des paramètres du DDMRP

Le mécanisme de réajustement commence par la création d'une entité pendant chaque période (elle représente la période de réajustement dans DDMRP). Ainsi, elle passe par le premier bloc « Collecte des données » qui englobe des boucles permettant la mesure de la consommation journalière pendant la période. Ensuite, l'entité passe par un bloc « réajustement des paramètres » qui consiste à réajuster les différentes zones des buffers de DDMRP.

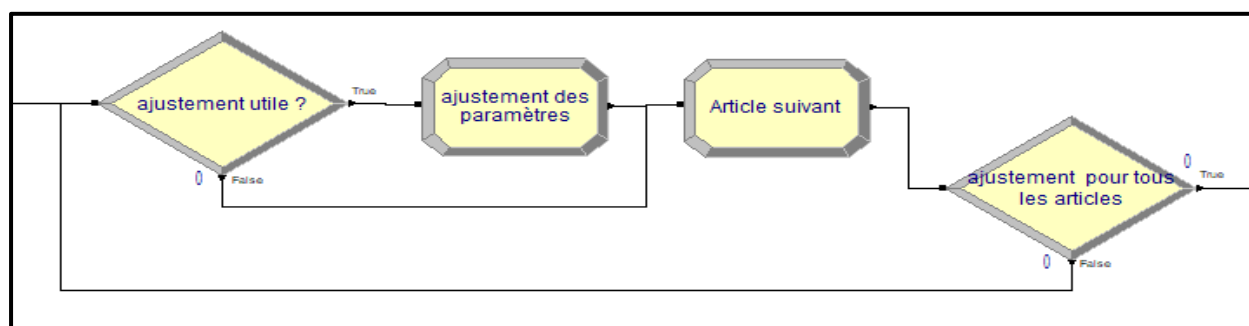


Figure 4.15 : Ajustement des paramètres

Dans les cas où il y a des périodes de saisonnalité des produits finis, le réajustement planifié est exécuté pendant ces périodes. Par conséquent, le réajustement est fait grâce à un facteur de réajustement.

#### 4.5.4 Planification pilotée par la demande

D'après le positionnement stratégique des buffers, tous les articles dans notre cas d'étude sont stockés. De plus, ils appartiennent à la catégorie articles réapprovisionnée. Le choix est justifié par les deux affirmations suivantes :

- ✓ Les articles ne peuvent pas être dans la catégorie articles réapprovisionnés forcés (vu qu'il n'y a aucune contrainte dans l'espace de stockage).
- ✓ Tous les articles sont stratégiques puisqu'ils sont tous les produits finis d'un des ateliers.

La planification des ordres de fabrication en DDMRP consiste à créer les différents lots de fabrication selon un processus bien déterminé. Il ne diffère pas beaucoup de celui de l'EOQ. Tout d'abord, une entité, permettant le calcul des différents niveaux des stocks projetés, est créée. Ensuite, elle détermine les articles qui nécessitent des réapprovisionnements. C'est-à-dire, elle détermine les articles dont les stocks projetés sont inférieurs à la limite supérieure de la zone jaune. Ainsi, les ordres de fabrication sont déterminés. Deux caractéristiques importantes sont ainsi générées dynamiquement à chaque création de lot. Soit la taille du lot (égale à TOG - niveau de stock projeté) et la priorité (égale à niveau de stock projeté / TOG).

Finalement, pour fabriquer un lot, la dernière étape consiste à vérifier la disponibilité de la matière première des ateliers. En effet, si la matière première est disponible le lot de fabrication est lancé directement (sans aucun délai d'attente) vers l'atelier correspondant. Sinon, le lot est maintenu dans un bloc « Hold » (comme le montre l'annexe F).

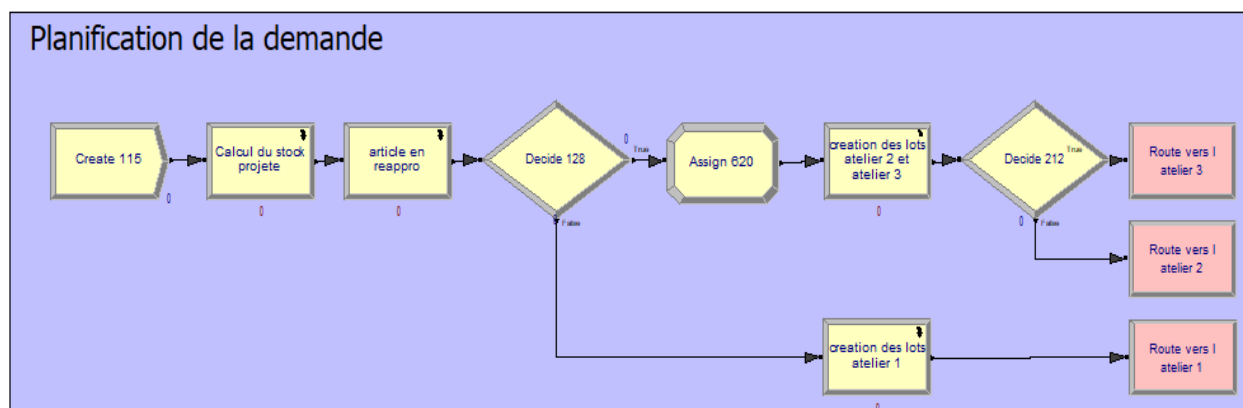


Figure 4.16 : Capture d'écran du processus de la planification de la demande en DDMRP

### 4.5.5 Exécution collaborative et visible

En DDMRP, l'exécution collaborative et visible consiste à créer des alertes dans le but d'anticiper les problèmes de rupture de stock et des retards des livraisons. Dans notre cas d'étude, nous allons considérer l'alerte du stock physique. Elle est bien expliquée à travers des exemples dans le livre de *Ptak et Smith : orlicky's material requirements planning, 3/edition, 2016*.

Ainsi, les priorités sont ajustées quotidiennement à travers un mécanisme d'ajustement de la priorité qui commence par la création d'une seule entité. Cette entité est libérée quotidiennement et elle ajuste la priorité des lots de fabrications en utilisant la formule suivante :

$Pr(\text{référence}) = \text{stock physique}(\text{référence}) / \text{TOP zone rouge}(\text{référence})$ .

Ensuite, elle parcourt les lots de fabrication poste par poste et elle calcule le niveau de stock physique et elle ajuste leurs priorités. La figure ci-dessous montre une capture d'écran du processus d'ajustement des priorités.

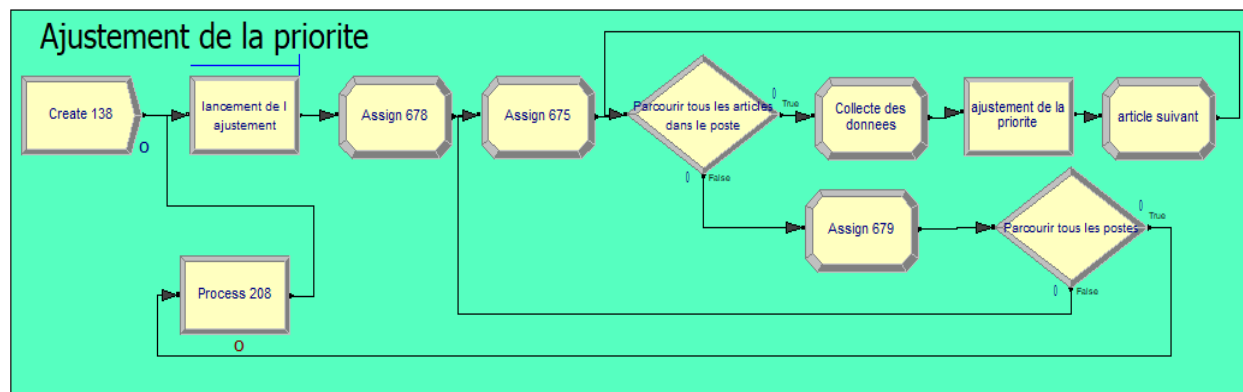


Figure 4.17 : Capture d'écran du processus d'ajustement des priorités

Si plusieurs ordres de fabrication sont dans la file d'attente d'un poste de travail, la priorité est accordée au lot avec la  $Pr(\text{référence})$  la plus petite.

En somme, dans cette partie le modèle DDMRP est décrit. En effet, les cinq piliers de DDMRP sont développés et sont justifiés pour notre cas d'étude. Ainsi, nous pouvons passer à la deuxième partie de cette phase de la méthodologie. Elle consiste à « vérifier et valider le modèle de simulation ».

## 4.6 Vérification et validation du modèle

La vérification et la validation du modèle sont la dernière étape de cette phase. Elle consiste à valider les modèles EOQ et DDMRP à partir du modèle conceptuel. En effet, l'objectif de la validation du modèle est de s'assurer de la qualité du modèle et de la crédibilité des résultats obtenus.

Du vue simulation, la vérification consiste à inspecter le modèle. Principalement, il s'agit de poser la question suivante : les événements, les processus et les ressources sont-ils correctement représentés? Le contrôle du modèle partie par partie et bloc par bloc fournit la réponse à cette question et relève les différents ajustements nécessaires. Ce processus est appelé la calibration. Il s'agit d'un processus itératif qui consiste à comparer le modèle et le système réel et faire des ajustements. De son côté, la validation du modèle est l'assurance que le modèle de simulation est fidèle aux systèmes réels et qu'il permet de répondre précisément aux questions de recherche initialement posées.

Dans la suite, nous allons présenter les techniques de simulation utilisées pour vérifier et valider nos modèles de simulation

- **Validation par l'animation** : grâce à l'animation, le comportement du modèle est représenté graphiquement dans le temps. Dans notre cas d'étude, nous devons constater si les lots de fabrication dans les ateliers et les opérateurs dans chaque atelier suivent-ils leurs trajectoires planifiées pendant une simulation.
- La simulation événement par événement (step by step) montre que les mouvements des lots de fabrication et les mouvements des opérateurs sont bien exécutés comme il a été planifié dans le modèle conceptuel.
- **Validation par les tests de certaines conditions extrêmes** : il s'agit de tester la réponse du modèle dans certains cas extrêmes. Ainsi, les résultats devraient être plausibles pour toute combinaison extrême des facteurs dans le système.
- Pour notre cas d'étude, beaucoup de conditions sont testées. Le tableau ci-dessous présente les conditions testées les plus importantes dans les deux modèles.

Tableau 4.14 : Tester les conditions extrêmes

Buts	Conditions	Résultats prévus	Validation
Tester s'il y a des obstructions dans le modèle	Exécuter le modèle avec un temps de fabrication égale à zéro	Les valeurs des lead times sont nulles; Toutes les utilisations des machines sont nulles. Tous les ordres de fabrication lancés sont reçus.	Condition validée
Tester l'efficacité du processus de la demande des clients	Annuler les quantités des demandes des clients	Aucun ordre de fabrication n'est lancé; Les niveaux de stock restent inchangés; Toutes les demandes sont satisfaites sans aucun délai d'attente.	Condition validée
Tester l'efficacité du processus d'ajustement des deux modèles	Annuler le processus d'ajustements des paramètres des deux modèles	Le modèle roule normalement, mais les résultats sont dégradés.	Condition validée
Tester le processus d'affectation des opérateurs	Annuler le processus d'affectations et le mettre aléatoire	Le modèle roule normalement, mais les résultats sont dégradés.	Condition validée

- **Validation par les tests dégénérés** : La dégénérescence du modèle consiste à tester le comportement du modèle en modifiant les valeurs des entrées et des paramètres internes.
- Dans notre cas d'étude, nous testons si le nombre moyen dans la file d'attente d'un poste continue à augmenter au fil du temps lorsque le taux d'arrivée est supérieur au temps de traitement.
- **Validation par les tests de validité interne** : Plusieurs répliques d'un modèle stochastique sont effectuées afin de déterminer si le modèle est stochastiquement stable (variabilité interne).
- L'exécution de plusieurs répliques (dix) de notre modèle montre qu'il n'y a pas une grande variabilité qui peut rendre les résultats du modèle douteux.

Généralement, il existe d'autre technique de vérification et de validation du modèle de simulation comme la validation historique des résultats et tester la variabilité des paramètres. La validation historique des résultats se fait généralement avec les données réelles de l'usine. Ainsi, elle semble impossible pour notre cas puisqu'il s'agit d'une entreprise fictive. En ce qui concerne la variabilité des paramètres, elle consiste à étudier l'effet des variations des facteurs sur les résultats. Elle est développée dans le chapitre suivant.

## **4.7 Conclusion**

Ce chapitre vise principalement à décrire et valider le modèle de simulation. Dans une première partie, les deux modèles de simulations avec leurs ateliers et leurs différents processus sont bien détaillés. Ensuite, les modèles EOQ et DDMRP avec leurs différentes étapes sont décrits. Finalement, une dernière partie vise à décrire les différentes techniques de validation des modèles utilisée et leurs résultats dans notre cas d'étude.

## **CHAPITRE 5    EXPÉRIENCES, RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

Ce chapitre porte principalement sur la cinquième phase de notre méthodologie de recherche « expérimenter et interpréter ». Ainsi ce chapitre est structuré de la façon suivante. D'une part, la première partie vise à définir le plan d'expérience. D'autre part, la deuxième partie vise à présenter les différentes expériences réalisées, les résultats trouvés et leurs interprétations.

### **5.1 Plan d'expérience**

D'après le troisième chapitre, nous avons retenus les expériences ci-dessous :

- 1<sup>ère</sup> expérience : la charge moyenne dans l'atelier est constante par semaine et la quantité commandée pour chaque produit est constante. En effet, le scénario représente un environnement parfait (aucune source de variabilité) ;
- 2<sup>ème</sup> expérience : la charge moyenne est constante. La quantité commandée et la fréquence pour chaque produit est variable. À travers ce type de variabilité, ce scénario représente un environnement semi-parfait (deux sources de variabilité) ;
- 3<sup>ème</sup> expérience : charge moyenne varie entre 70% et 110% et la quantité commande pour chaque produit est variable. Ainsi, ce scénario, avec des sources de variabilités, représente l'environnement de nos jours ;
- 4<sup>ème</sup> expérience : charge moyenne est constante avec des saisonnalités pour certains produits à chaque période. Ce scénario reflète un environnement avec saisonnalité.

Dans les annexes G, H, I et J, nous présentons un exemple de scénario (produits commandés par semaine) pour respectivement de la première, la deuxième, la troisième et la quatrième expérience.

Le tableau ci-dessous présente le plan d'expérience et les différents facteurs variés. Ces facteurs sont principalement la charge moyenne la quantité commandée et la fréquence de commande. De plus, les facteurs marqués en italique sont modifiés aléatoirement d'un scénario à un autre.

Tableau 5.1 : Plan d'expérience

Scénario	Charge moyenne	Pourcentage de la charge maximale	Quantité commandée	Fréquence de commande
1 <sup>er</sup> expérience	Constante 324 pièces	82,50 %	Constante 6 pièces de chaque article	Constante 2 fois par semaine
2 <sup>ème</sup> expérience	Constante 324 pièces	82,50 %	<i>Variable</i>	<i>Variable</i>
3 <sup>ème</sup> expérience	<i>Variable</i>	Entre 70 % et 110 %	<i>Variable</i>	<i>Variable</i>
4 <sup>ème</sup> expérience	Constante 324 pièces	82,50 %	Suit une saisonnalité	Constante 2 fois par semaine

## 5.2 Expérimentation et interprétation

Cette partie vise à présenter les différents résultats de chaque expérience. Ainsi, pour chaque expérience, nous allons utiliser des figures et des tableaux pour comparer les indicateurs de performance des deux modèles. En deuxième lieu, pour chaque indicateur de performance, nous allons interpréter les résultats trouvés

### 5.2.1 1<sup>ère</sup> expérience : résultats et interprétation

Les scénarios de la première expérience représentent un environnement parfait c'est-à-dire aucune source de variabilité n'est implémentée. En effet, la charge moyenne est constante par semaine et la quantité commandée pour chaque produit et sa fréquence de commande sont constantes.

- Indicateurs liés à la satisfaction des clients

Le tableau suivant montre les résultats des indicateurs liés à la satisfaction des clients.

Tableau 5.2 : 1<sup>ère</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients

<b>Indicateurs</b>	<b>EOQ</b>	<b>DDMRP</b>
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 3	89,62 %	99,98 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 2	91,74 %	99,85 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 1	97,17 %	100,00 %
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 3	5,03 jours	0,01 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 2	13,26 jours	0,37 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 1	12,47 jours	0,00 jour

L'analyse des indicateurs montre que, en termes de satisfaction des clients, le DDMRP a satisfait pratiquement toutes les commandes dans les différents ateliers. Quant à l'EOQ, les pourcentages des commandes satisfaites dans les différents ateliers sont généralement acceptables (généralement ils sont supérieurs à 90%). Cependant, ils sont inférieurs considérablement à ceux du DDMRP.

De plus, en ce qui concerne les commandes non satisfaites directement à partir des stocks, le DDMRP était plus réactif (les délais de satisfaction du DDMRP sont considérablement inférieurs à ceux de l'EOQ).

- Indicateurs liés aux stocks

Le tableau suivant montre les résultats des indicateurs liés aux stocks.

Tableau 5.3 : 1<sup>ère</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Taux de rotations des stocks des PF	1,66	1,02
Taux de couvertures des stocks des PF	7,27 jours	10,08 jours
Stocks moyens sur une semaine	3983 pièces	5567 pièces

D'après le tableau précédent, il est vrai que le taux de rotations des stocks des produits finis de l'EOQ est plus important que le DDMRP puisque ses niveaux des stocks des produits finis étaient inférieurs à ceux du DDMRP. Cependant, le DDMR était capable de mieux couvrir les stocks des produits finis tout en conservant un stock moyen supérieur à celui de l'EOQ. Ainsi, les courbes dans la figure suivante montrent l'évolution des niveaux des stocks dans les ateliers.

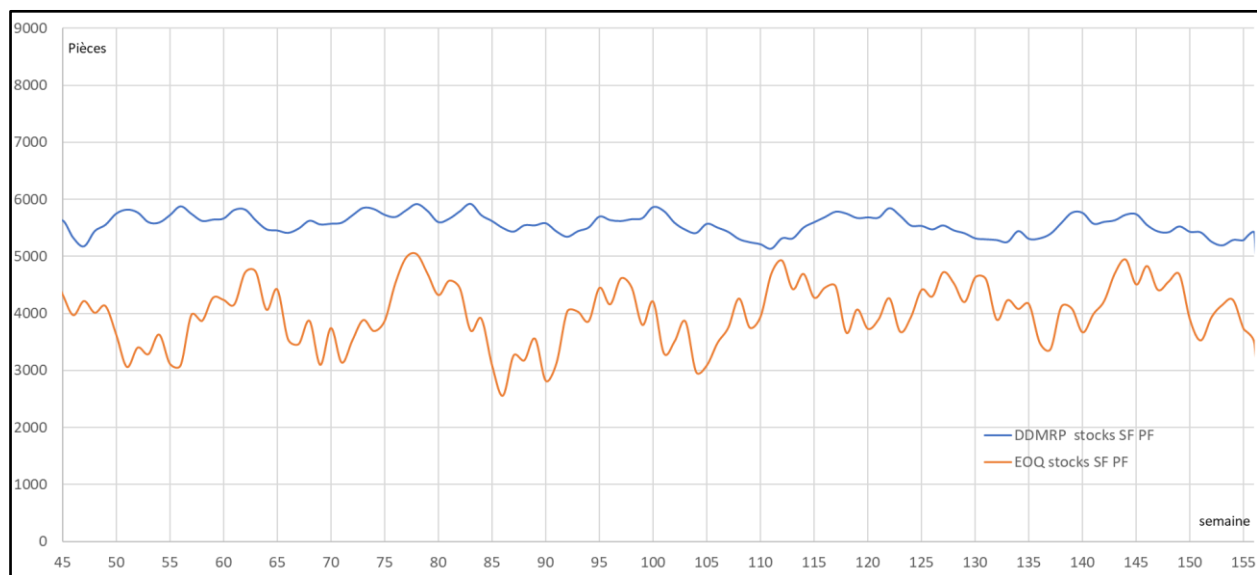


Figure 5.1 : 1<sup>ère</sup> expérience : évolutions des niveaux de stocks moyens

- Indicateurs liés à la finance

Le tableau suivant montre les fonds de roulement des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.4 : 1<sup>ère</sup> expérience : fonds de roulement moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Fonds de roulement WC	116 824 \$	107 355 \$

La courbe de la variation des fonds de roulement des deux modèles, pendant la période de simulation, est tracée dans la figure ci-dessous.

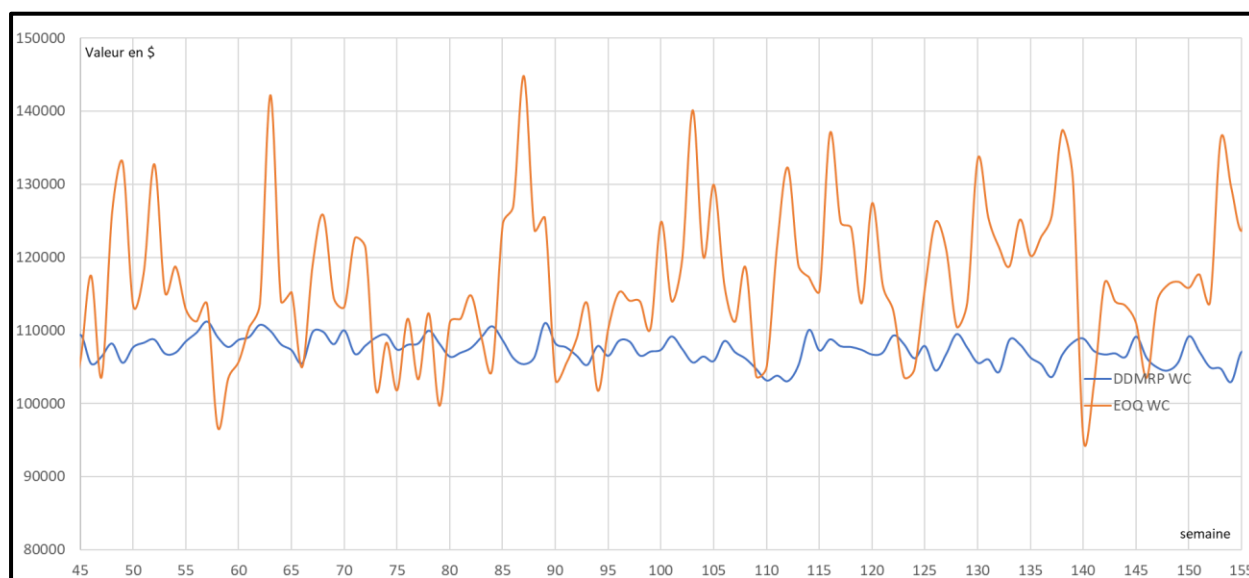


Figure 5.2 : 1<sup>ère</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens

La figure précédente montre que le fonds de roulement de DDMRP était quasiment stable au cours de la période de simulation contrairement aux fonds de roulement de EOQ qui était instable et moyennement supérieure.

- Indicateurs liés aux délais

Le tableau suivant montre les leads times dans les ateliers des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.5: 1<sup>ère</sup> expérience : les leads times moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Lead time dans l'atelier 1	82,10 jours	30,92 jours
Lead time dans l'atelier 2	5,68 jours	2,97 jours
Lead time dans l'atelier 3	4,24 jours	3,08 jours

La comparaison des valeurs des leads times entre les deux modèles EOQ et DDMRP montre que le DDMRP est capable de réduire les leads Time dans les ateliers. En effet, le lead time dans l'atelier 3 est réduit de 27,35 % et dans l'atelier 2, il est réduit de 47,71 % et dans l'atelier 1, il est réduit de 62,33 %.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution des leads times dans les trois ateliers des deux modèles.

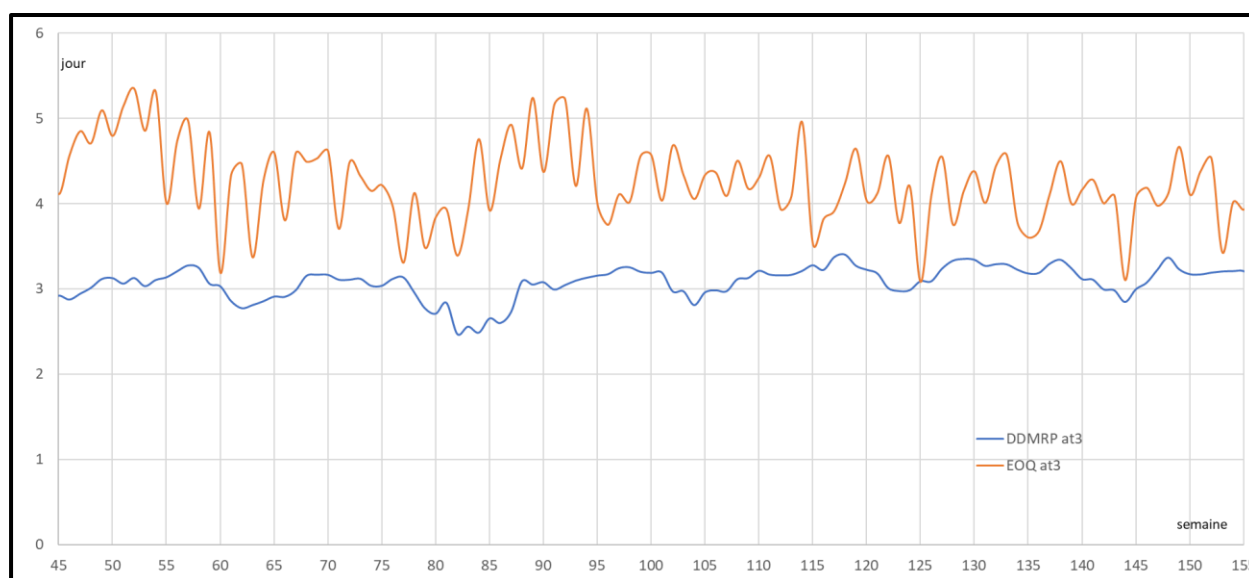


Figure 5.3 : 1<sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3

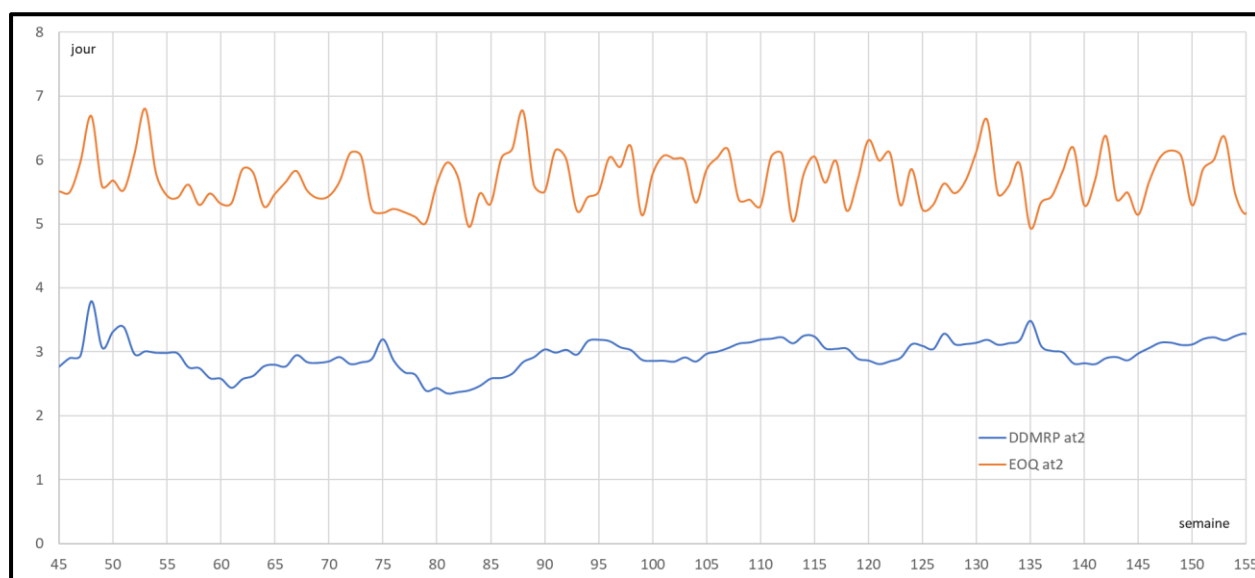


Figure 5.4 : 1<sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2

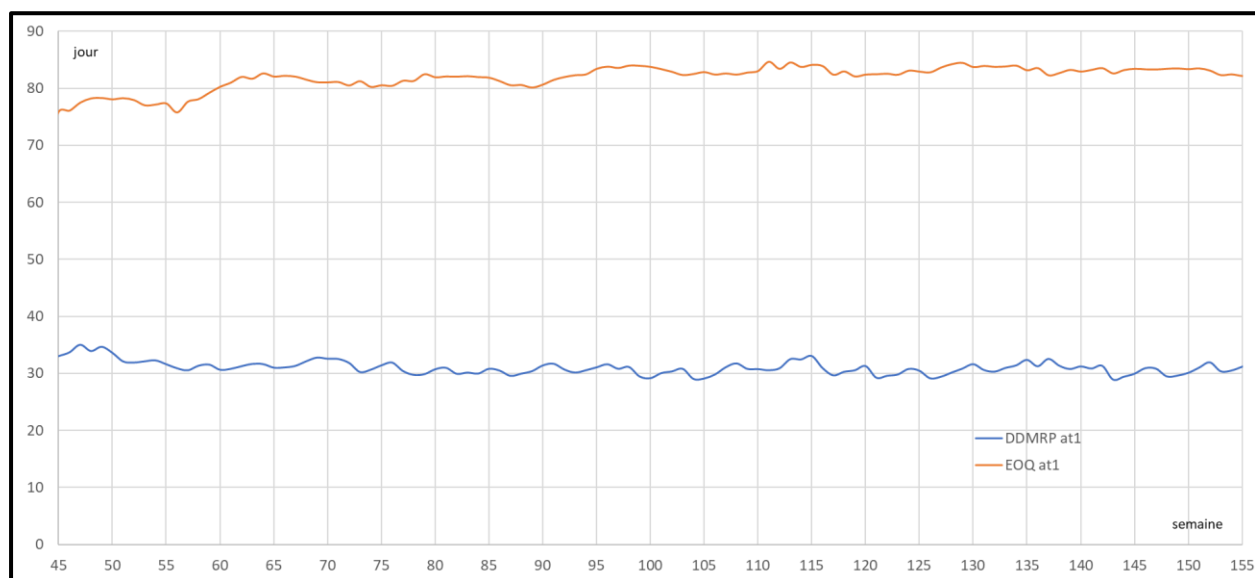


Figure 5.5 : 1<sup>ère</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1

### 5.2.2 2<sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation

Les scénarios de la 2<sup>ème</sup> expérience représentent un environnement avec une variabilité externe. En effet, la charge moyenne est constante. La quantité commandée et la fréquence pour chaque produit sont variables.

- Indicateurs liés à la satisfaction des clients

Les indicateurs liés à la satisfaction des clients sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.6 : 2<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 3	90,22 %	99,89 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 2	96,58 %	99,85 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 1	94,50 %	100,00 %
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 3	6,98 jours	0,5 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 2	8,60 jours	1,04 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 1	18,62 jours	0,00 jour

Généralement, les deux modèles ont été performants. En effet, les différents pourcentages des commandes satisfaites directement des deux modèles sont supérieurs à 90,00 %. Cependant, la

comparaison des indicateurs des deux modèles montre que le DDMRP est plus performant que l'EOQ. En effet, DDMRP est capable de mieux satisfaire les demandes que l'EOQ. De plus, les différentes durées d'attente moyenne des commandes de DDMRP sont inférieures à celles de l'EOQ.

- Indicateurs liés aux stocks

Les indicateurs liés aux stocks sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.7 : 2<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Taux de rotations des stocks des PF	0,97	2,47
Taux de couvertures des stocks des PF	8,77 jours	14,20 jours
Stocks moyens sur une semaine	3506 pièces	4102 pièces

Le tableau précédent montre que DDMR était capable de mieux couvrir les stocks des produits finis que l'EOQ. Cependant, les niveaux des stocks moyens de DDMRP étaient supérieurs à ceux de l'EOQ. Ainsi, la figure ci-dessous montre l'évolution des niveaux de stocks moyens pendant la période de simulation.

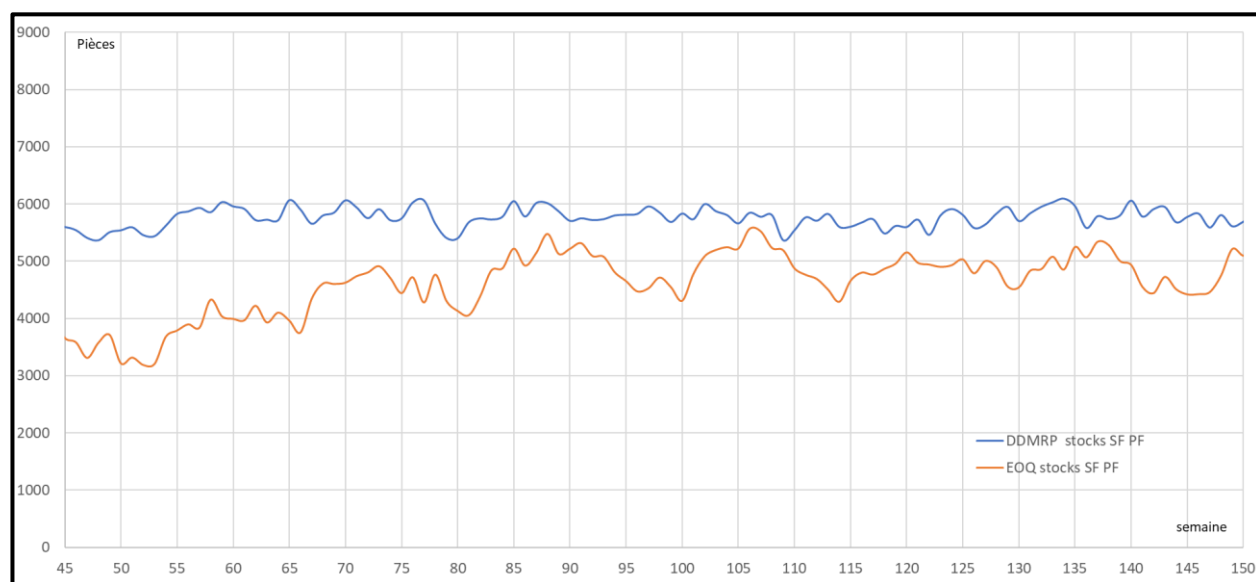


Figure 5.6 : 2<sup>ème</sup> expérience : évolutions des niveaux de stocks moyens

Avec DDMRP, les niveaux de stocks sont plus stables. Cependant avec l'EOQ, les niveaux de stocks varient entre 3000 pièces et 6000 pièce, ce qui donne moins de visibilité pour planifier les ventes.

- Indicateurs liés à la finance

Le tableau suivant montre les fonds de roulement des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.8 : 2<sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Fonds de roulement WC	123 554\$	107 200\$

Le DDMRP a conservé un fonds de roulement plus stable au cours de la période de simulation (il varie quasiment entre 100 000\$ et 110 000\$). Quant à l'EOQ, le fonds de roulement était plus élevé et énormément variable (il varie fortement entre 100 000\$ et 170 000\$). La figure ci-dessous montre l'évolution du fonds de roulement des deux modèles pendant la période de simulation.

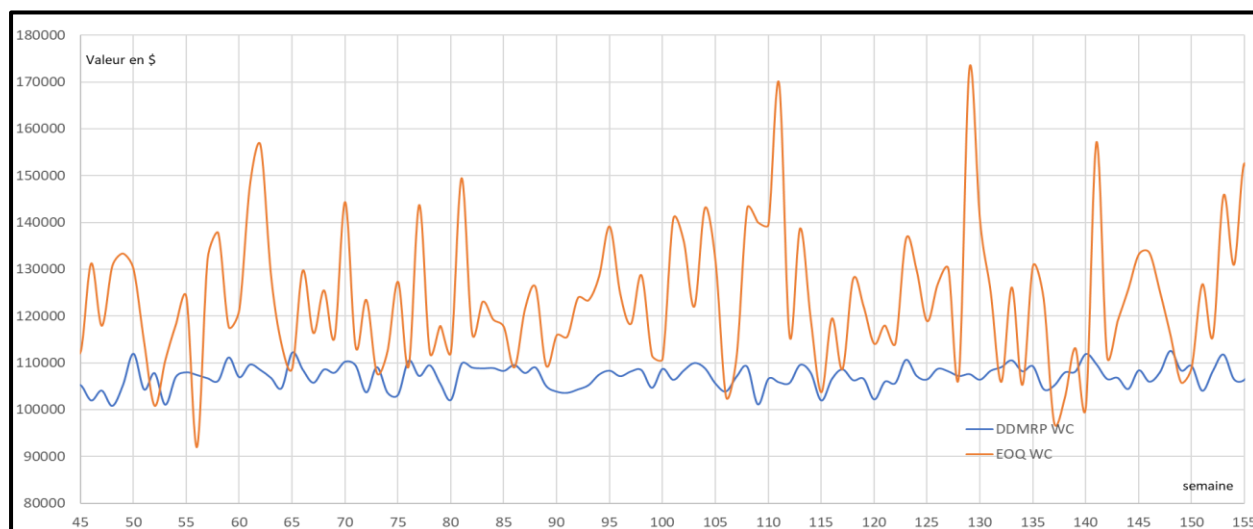


Figure 5.7 : 2<sup>ème</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens

- Indicateurs liés aux délais

Le tableau suivant montre les leads times dans les ateliers des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.9 : 2<sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Lead time dans l'atelier 1	71,38 jours	22,29 jours
Lead time dans l'atelier 2	3,40 jours	2,90 jours
Lead time dans l'atelier 3	2,10 jours	0,92 jour

Par rapport à l'EOQ, le DDMRP réduit les leads Time moyens dans les ateliers. En effet, le lead Time dans l'atelier 3 est réduit de 56,19 %, dans l'atelier 2, il est réduit de 14,70% et dans l'atelier 1, il est réduit de 68,77 %.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution des leads times dans les trois ateliers des deux modèles.

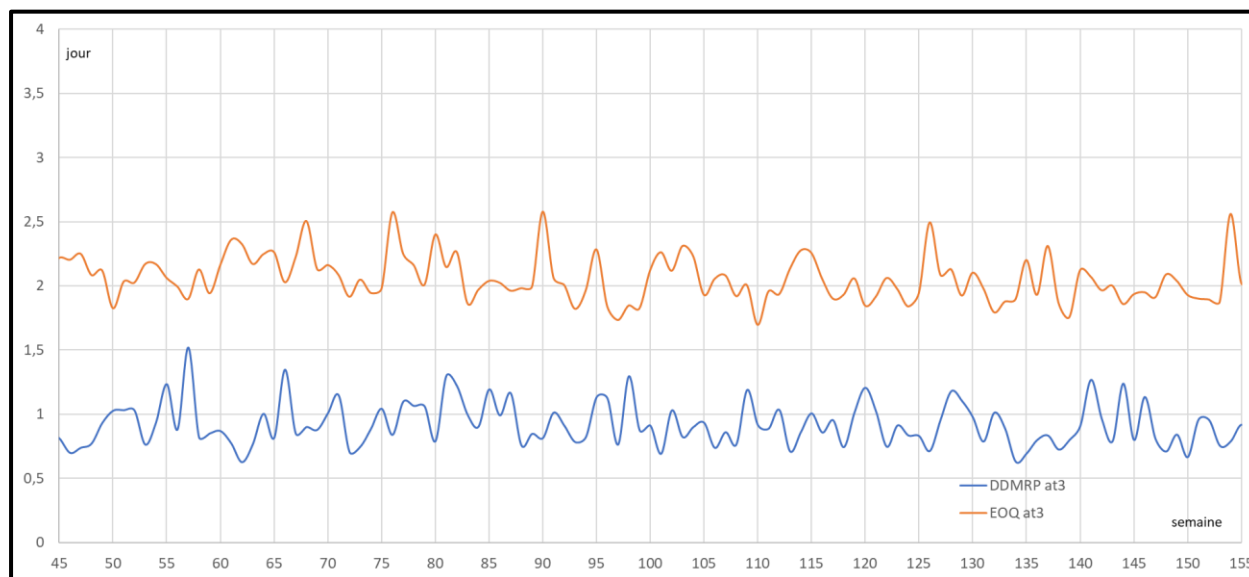


Figure 5.8 : 2<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3

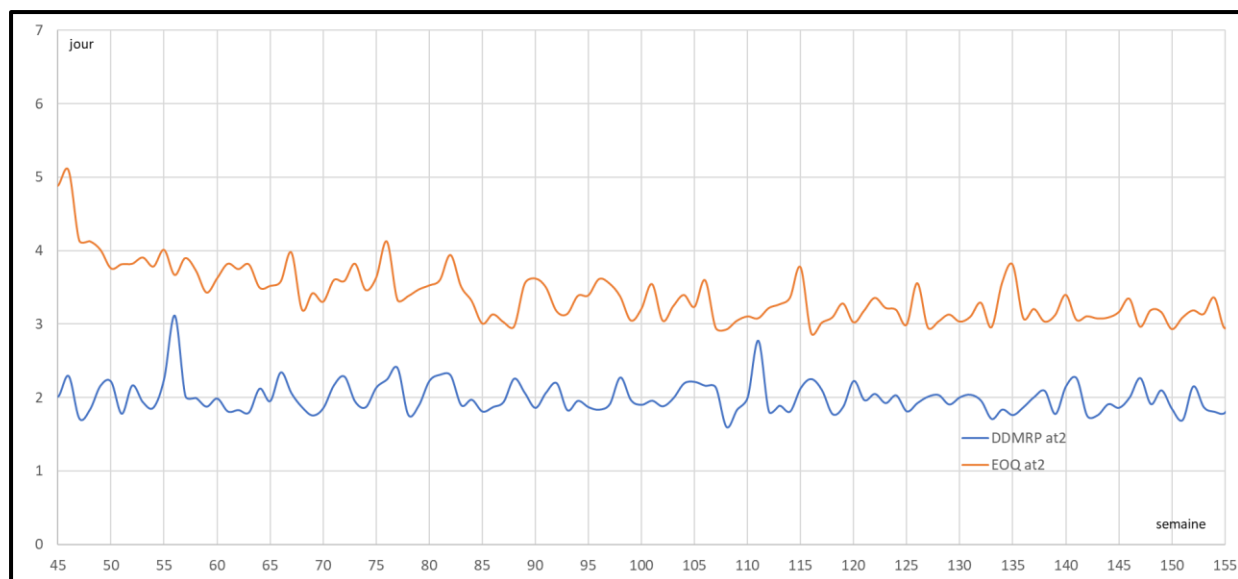


Figure 5.9 : 2<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2

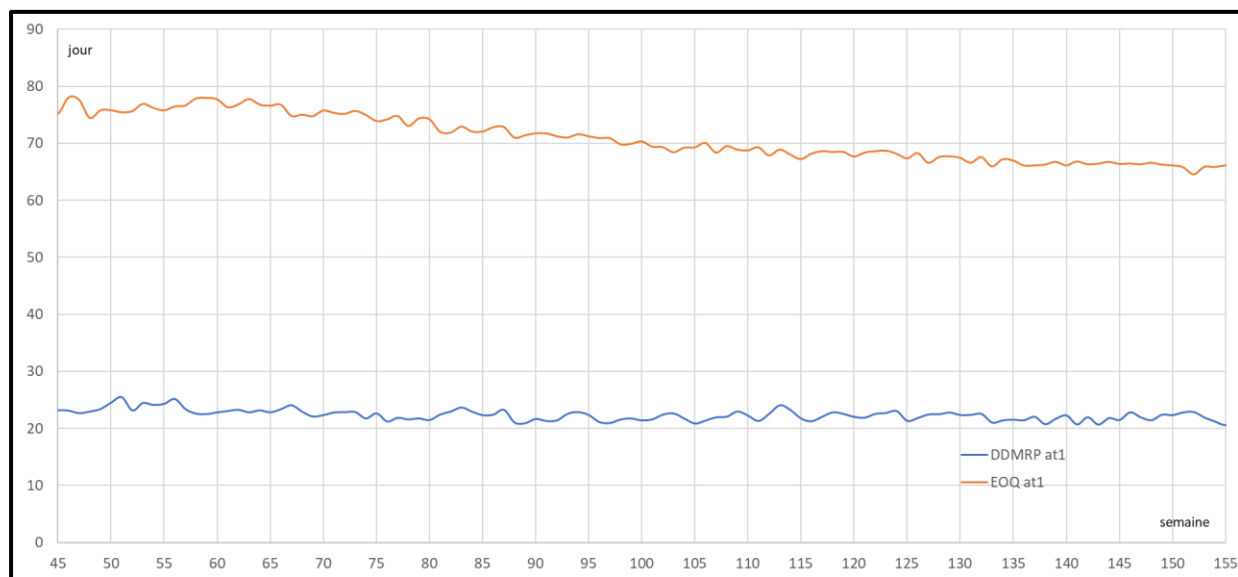


Figure 5.10 : 2<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1

L'analyse des courbes montrent qu'avec DDMRP les leads time dans chacun des ateliers sont non seulement inférieurs à ceux de l'EOQ, mais aussi ils sont plus stables (peu de variations et de pics). De ce fait, la production est plus fluide.

### 5.2.3 3<sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation

Les scénarios de la 3<sup>ème</sup> expérience représentent l'environnement le plus proche à notre environnement actuel. En effet, la charge moyenne varie entre 70% et 110%. La quantité commande pour chaque produit et sa fréquence de commande sont variables.

- Indicateurs liés à la satisfaction des clients

Les indicateurs liés à la satisfaction des clients sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.10 : 3<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 3	87,19 %	99,75 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 2	96,17 %	99,70 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 1	91,51 %	99,99 %
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 3	9,10 jours	0,76 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 2	10,02 jours	0,49 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 1	15,79 jours	0,16 jour

Face à un environnement plein de variabilités, DDMRP a pu satisfaire la majorité des commandes des différents ateliers, soit au moins 99,70 % sont satisfaites. De plus, les délais d'attente moyens des commandes en cas de non-satisfaction directe sont très faibles.

Quant à l'EOQ, il est vrai qu'il était performant surtout pour l'atelier 2. Cependant, DDMRP était plus performant que ce soit au niveau des pourcentages de satisfaction des commandes ou au niveau des durées d'attentes moyennes des commandes non satisfaites directement.

- Indicateurs liés aux stocks

Les indicateurs liés aux stocks sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.11 : 3<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Taux de rotations des stocks des PF	2,35	1,39
Taux de couvertures des stocks des PF	8,40 jours	13,6 jours
Stocks moyens sur une semaine	1451 pièces	1876 pièces

Le taux de rotation des produits finis du DDMRP est inférieur à celui de l'EOQ. Cela peut être justifié à travers les niveaux de stock de l'EOQ qui est inférieur à celui du DDMRP. En contrepartie, DDMR était capable de mieux couvrir les stocks des produits finis que l'EOQ. Pendant la période de simulations, les niveaux des stocks moyens de la méthode DDMRP étaient plus supérieurs à ceux de l'EOQ comme le montre la figure ci-dessous.

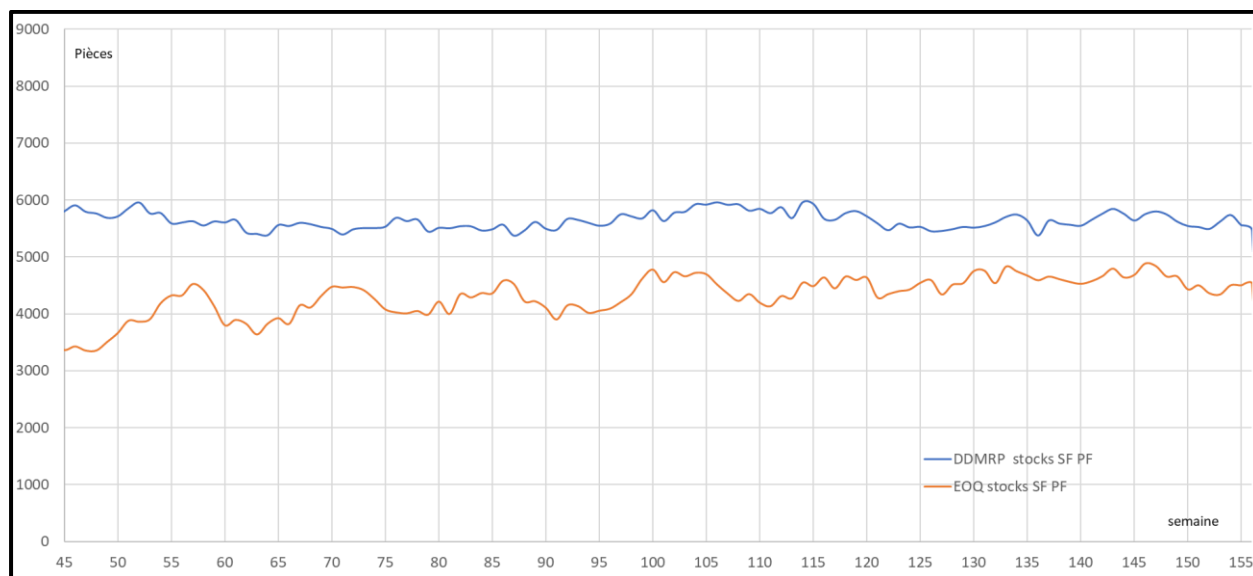


Figure 5.11 : 3<sup>ème</sup> expérience : évolution des niveaux de stocks moyens

- Indicateurs liés à la finance

Le tableau suivant montre les fonds de roulement des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.12 : 3<sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Fonds de roulement WC	126 860\$	106 087\$

Moyennement, le fonds de roulement de DDMRP est considérablement inférieur à celui de l'EOQ avec une différence de 20 000\$. De plus, DDMRP a conservé un fonds de roulement plus stable au cours de la période de simulation (il varie quasiment entre 100 000\$ et 110 000\$). Quant à l'EOQ, le fonds de roulement était plus élevé et moins stable (il varie fortement entre 100 000\$ et 150 000\$). La figure ci-dessous montre l'évolution du fonds de roulement des deux modèles pendant la période de simulation.

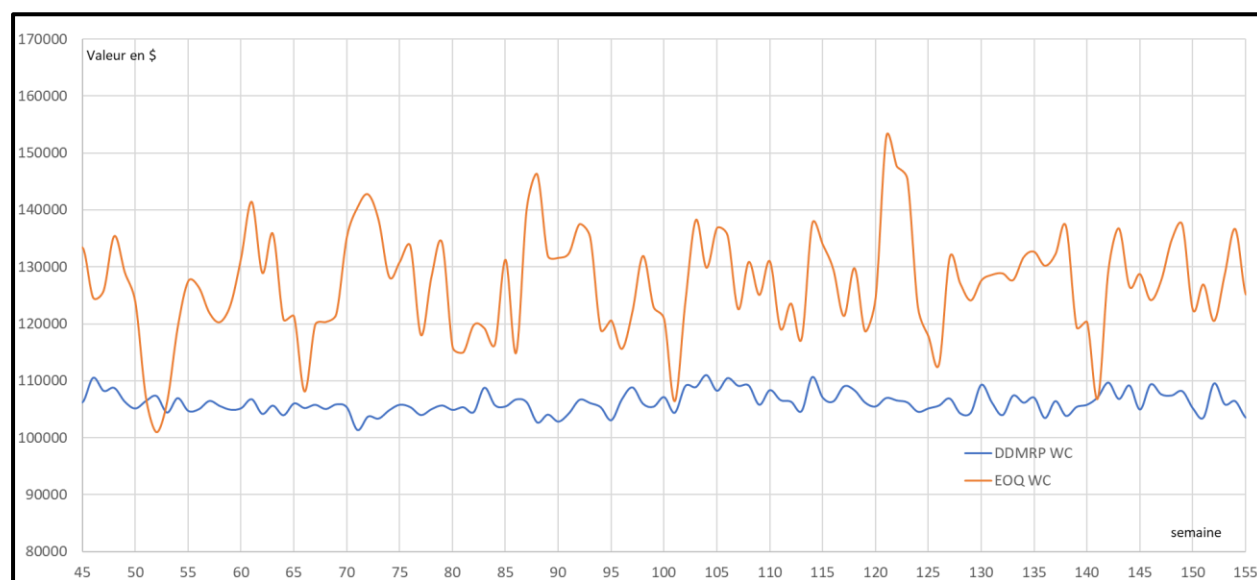


Figure 5.12 : 3<sup>ème</sup> expérience : évolutions des fonds de roulements moyens

- Indicateurs liés aux délais

Le tableau suivant montre les leads times dans les ateliers des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.13 : 3<sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Lead time dans l'atelier 1	75,8 jours	27,08 jours
Lead time dans l'atelier 2	3,52 jours	2,82 jours
Lead time dans l'atelier 3	2,11 jours	1,08 jour

En comparant les différents leads times des deux modèles, nous remarquons que le DDMRP réduit les leads time moyen dans les ateliers. En effet, le lead Time dans l'atelier 3 est réduit de 41,81 %, dans l'atelier 2, il est réduit de 19,88 % et dans l'atelier 1, il est réduit de 64,27 %. Ainsi, les différentes courbes des leads times sont présentées dans les figures ci-dessous.

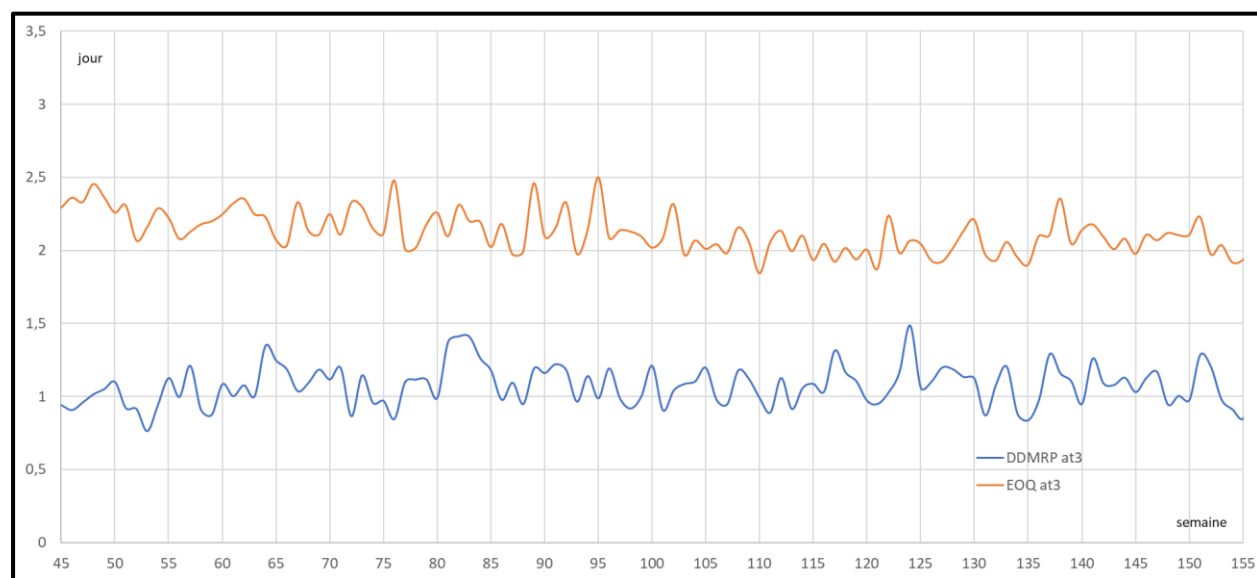


Figure 5.13 : 3<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3

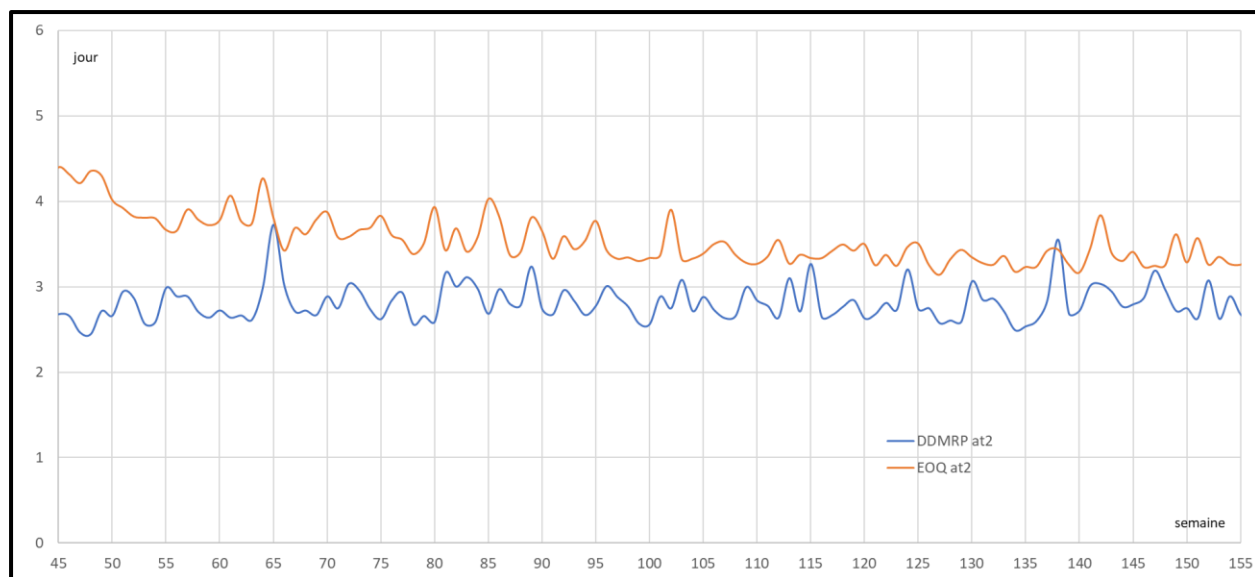


Figure 5.14 : 3<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2

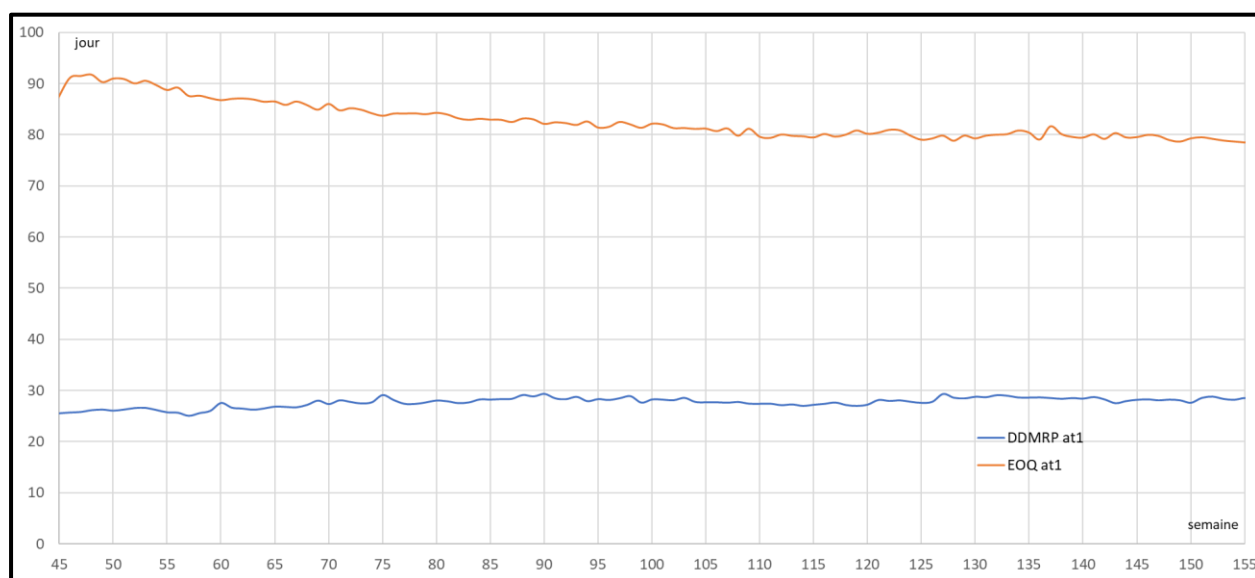


Figure 5.15 : 3<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1

#### 5.2.4 4<sup>ème</sup> expérience : résultats et interprétation

Les scénarios de la 4<sup>ème</sup> expérience représentent un environnement avec saisonnalité. En effet, la charge moyenne constante avec des saisonnalités pour certains produits à chaque période.

- Indicateurs liés à la satisfaction des clients

Les indicateurs liés à la satisfaction des clients sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.14 : 4<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés à la satisfaction des clients

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 3	90,32 %	99,88 %
Pourcentage des commandes satisfaites directement de l'atelier 2	96,53 %	99,84 %
Pourcentage des commandes satisfaites0 directement de l'atelier 1	93,51 %	99,99 %
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 3	6,51 jours	0,50 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 2	8,60 jours	1,04 jour
Durée d'attente moyenne des commandes non satisfaites directement de l'atelier 1	15,71 jours	0,06 jour

D'une vue générale, nous remarquons que les deux modèles étaient performants dans ce scénario. En effet, en point de vue satisfaction des clients, les pourcentages des commandes satisfaites directement dans chaque atelier dépassent les 90,00 % pour les deux modèles.

La comparaison des deux modèles montre que le DDMRP a satisfait pratiquement toutes les commandes avec des pourcentages des commandes supérieurs à 99,84 % et des durées d'attentes moyennes pour les satisfaire sont raisonnables (un demi-jour pour l'atelier 3, un jour pour l'atelier 2 et moins d'une heure pour l'atelier 1). Quant à l'EOQ, les durées d'attentes moyennes pour satisfaire les commandes sont assez importantes pour un environnement Make To Stock (autour d'une semaine pour les ateliers 2 et 3 et autour de deux semaines pour l'atelier 1).

- Indicateurs liés aux stocks

Les indicateurs liés aux stocks sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5.15 : 4<sup>ème</sup> expérience : indicateurs liés aux stocks moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Taux de rotations des stocks des PF	2,10	1,51
Taux de couvertures des stocks des PF	8,80 jours	14,3 jours
Stocks moyen sur une semaine	1510 pièces	1950 pièces

Également dans cet environnement, il est vrai que le taux de rotation des produits finis du DDMRP est inférieur à celui de l'EOQ. Cela peut être justifié à travers les niveaux de stock de l'EOQ qui sont inférieurs à ceux du DDMRP (également des produits finis). Comme le tableau ci-dessous le montre, DDMR était plus capable de couvrir les stocks des produits finis que l'EOQ. Pendant la période de simulations, les niveaux des stocks moyens de DDMRP étaient plus supérieurs à ceux de l'EOQ comme le montre la figure ci-dessous.

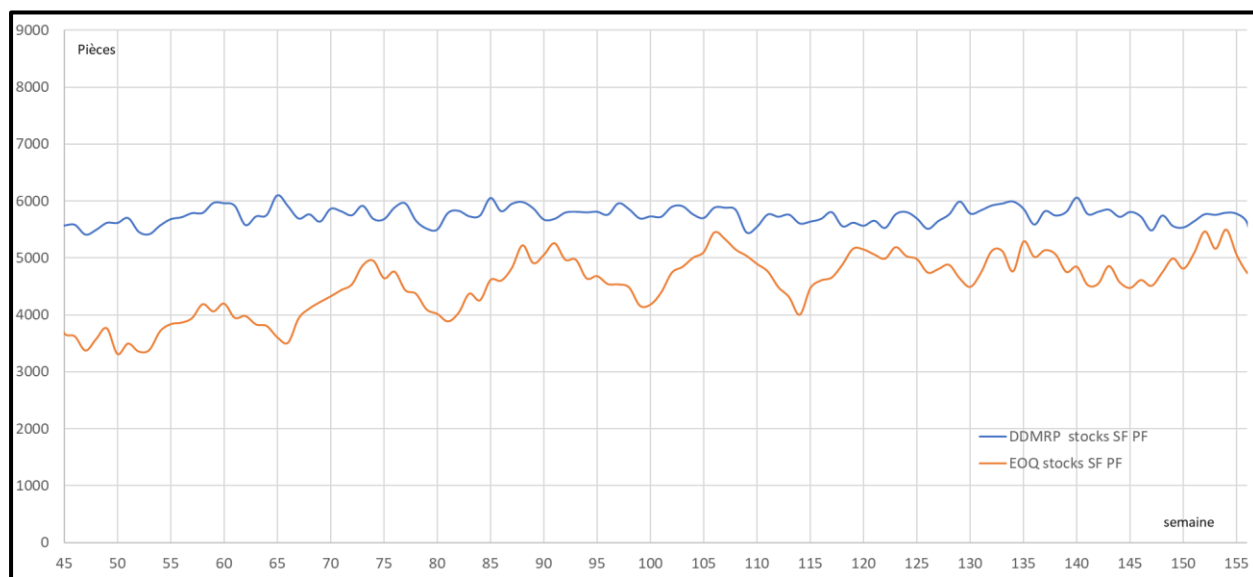


Figure 5.16 : 4<sup>ème</sup> expérience : évolution des niveaux des stocks moyens

- Indicateurs liés à la finance

Le tableau suivant montre les fonds de roulement des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.16 : 4<sup>ème</sup> expérience : fonds de roulement moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Fonds de roulement WC	124 064\$	108 271\$

Dans cet environnement, le fonds de roulement moyen de DDMRP est considérablement inférieur à celui de l'EOQ avec une différence de 15 000\$. De plus, DDMRP a conservé un Fonds de roulement moyen plus stable, comme le montre la figure ci-dessous, au cours de la période de simulation (il varie presque entre 100 000\$ et 110 000\$). Quant à l'EOQ, le fonds de roulement moyen était plus élevé et moins stable (il varie énormément entre 100 000\$ et 150 000\$).

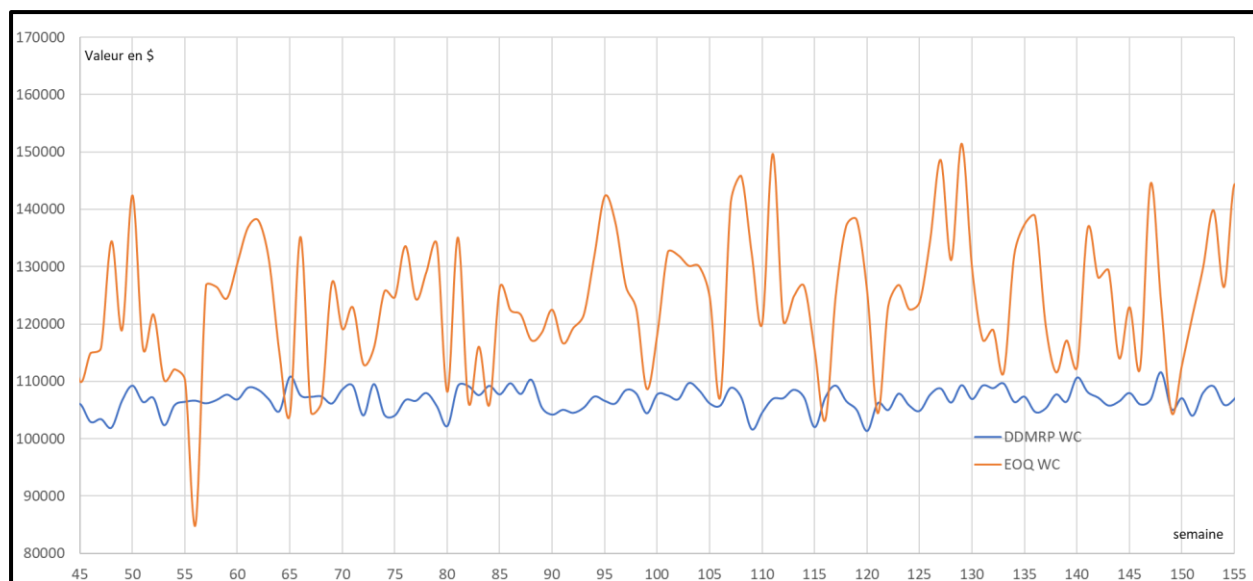


Figure 5.17 : 4<sup>ème</sup> expérience : évolution des fonds de roulement moyens

- Indicateurs liés aux délais

Le tableau suivant montre les leads times dans les ateliers des deux modèles EOQ et DDMRP.

Tableau 5.17 : 4<sup>ème</sup> expérience : les leads times moyens

Indicateurs	EOQ	DDMRP
Lead time dans l'atelier 1	72,08 jours	23,29 jours
Lead time dans l'atelier 2	3,36 jours	1,82 jour
Lead time dans l'atelier 3	2,03 jours	0,9 jour

En comparant les différents leads times dans les ateliers des deux modèles, nous remarquons que le DDMRP réduit les leads Time moyens dans les ateliers. En effet, le lead Time dans l'atelier 3 est réduit de 55,66 % et dans l'atelier 2, il est réduit de 45,83 % l'atelier 1, il est réduit de 67,68 %. Ainsi, les courbes dans les figures ci-dessous montrent l'évolution des leads times dans les ateliers.

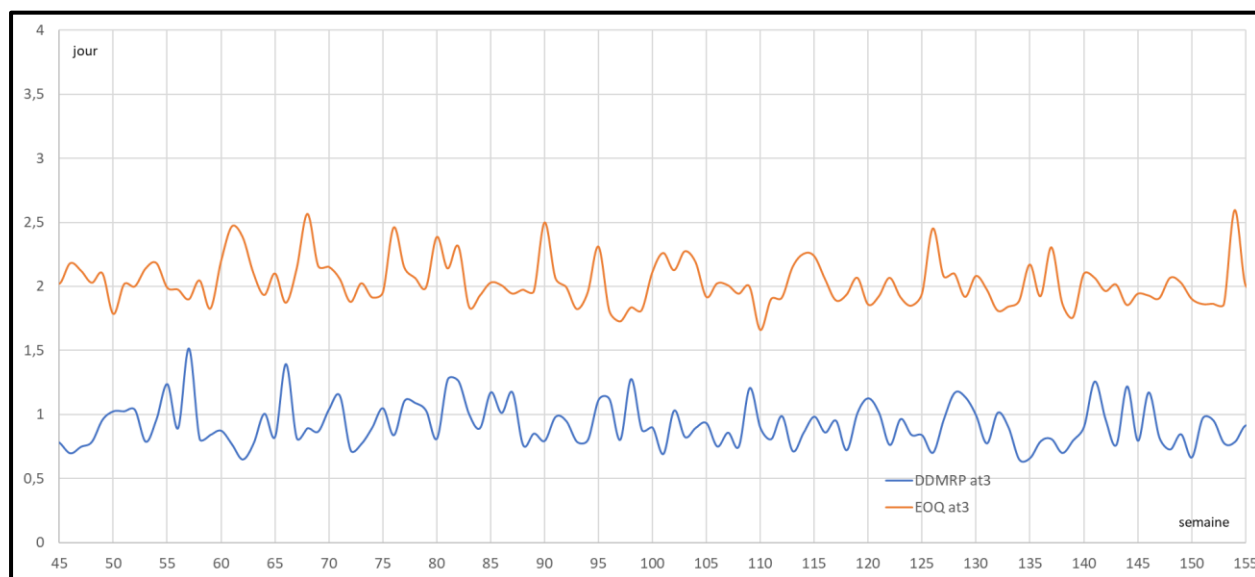


Figure 5.18 : 4<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 3

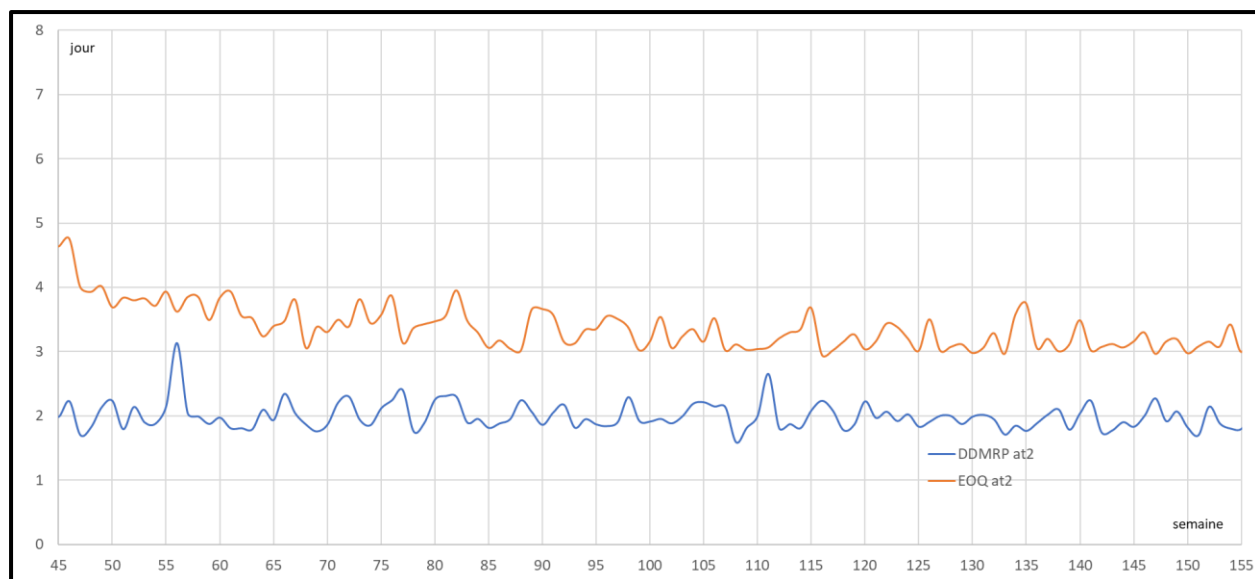


Figure 5.19 : 4<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 2

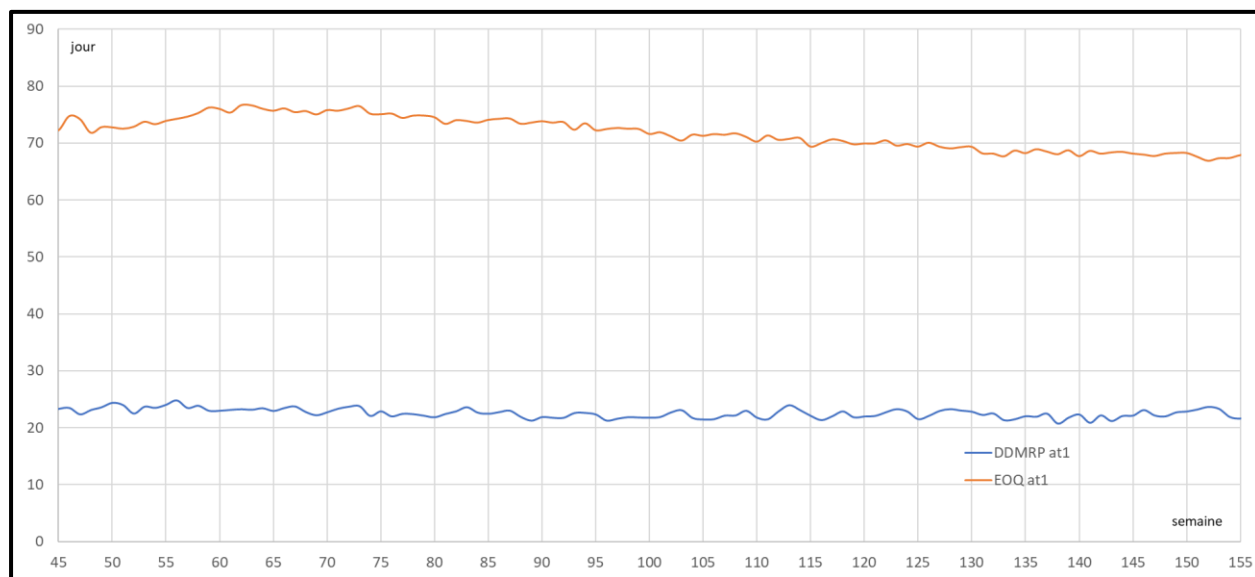


Figure 5.20 : 4<sup>ème</sup> expérience : évolution des leads times moyens dans l'atelier 1

### 5.3 Interprétation

En somme, DDMRP était plus performant que l'EOQ dans les différentes expériences. En effet, avec moins de capital immobilisé dans les stocks et les encours, les pourcentages des commandes satisfaites directement à partir des stocks du DDMRP étaient toujours supérieurs à ceux de l'EOQ. Également, pour les commandes qui ne réussissent pas à être satisfaites directement des stocks, avec DDMRP, leurs délais de satisfaction étaient inférieurs à ceux du EOQ. Au niveau des leads time, en comparant DDMRP et EOQ, nous remarquons que DMRP était capable de réduire considérablement les leads time moyens dans chaque atelier. Également, nous apercevons qu'avec DDMRP le fonds de roulement est inférieur et plus stable qu'à celui de l'EOQ.

En considérant tout ce qui précède, nous aboutissons à notre objectif de ce projet de recherche. De plus, les promesses de DDMRP, fixés au début, sont validées. Il s'agit :

- 1: DDMRP aide à absorber l'amplification de la demande (l'effet de fouet);
- 2: DDMRP garde l'inventaire dans un état optimal;
- 3: DDMRP est capable de résister contre les variabilités de la demande;
- 4: DDMRP garantit la satisfaction des clients.

De ce fait, la contribution de ce projet de recherche se manifeste clairement à travers l'atteint de l'objectif de recherche et la validation des différentes promesses.

### 5.4 Conclusion

Dans le but de comparer le DDMRP et l'EOQ, ce chapitre portait sur les différentes expériences réalisées, les résultats trouvés et leurs interprétations. La comparaison des indicateurs de performances des deux modèles montrent que DDMRP était plus performant que l'EOQ.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le but principal de ce projet de recherche est de comparer les deux approches DDMRP et EOQ dans des différents environnements. Ainsi, le présent mémoire se compose principalement de quatre grands chapitres.

À travers les expériences réalisées dans le chapitre précédent et leurs résultats, nous avons constaté que DDMRP était plus performant que l'EOQ dans les différents scénarios. En effet, nous avons remarqué, à travers l'analyse des indicateurs liés aux délais, que DMRP était capable de réduire considérablement les leads time moyens dans chaque atelier. De plus, les leads time étaient moins variables que ceux du EOQ. Pareillement aux indicateurs liés à la finance, nous avons remarqué qu'avec DDMRP le fonds de roulement est moyennement inférieur et plus stable qu'à celui de l'EOQ.

En interprétant les indicateurs liés à la satisfaction des clients, nous avons constaté que les pourcentages des commandes satisfaites directement à partir des stocks de DDMRP étaient toujours supérieurs à ceux de l'EOQ. Également, pour les commandes qui ne sont pas satisfaites directement à partir des stocks, nous avons remarqué qu'avec le DDMRP, leurs délais de satisfaction étaient beaucoup plus inférieurs qu'avec EOQ.

L'analyse des indicateurs liés aux stocks montre que DDMRP était capable de mieux couvrir les stocks des produits finis que l'EOQ. Par conséquent, les niveaux de stocks moyens de DDMRP étaient plus élevés qu'avec la méthode EOQ. De plus, DDMRP a maintenu des niveaux de stocks moyens plus stables. Généralement dans les expériences réalisées, les taux de rotations des stocks de l'EOQ étaient supérieurs à ceux du DDMRP. Cela est justifié par le fait que les niveaux des stocks des produits finis de DDMRP étaient supérieurs.

Généralement, en constatant tous les indicateurs de performances dans les différents scénarios, nous avons pu confirmer les hypothèses suivantes de DDMRP.

H1: DDMRP aide à absorber l'amplification de la demande (l'effet de fouet);

H2: DDMRP garde les inventaires dans des meilleurs états;

H3: DDMRP est capable de résister contre de variabilité de la demande;

H4: DDMRP satisfait plus rapidement les commandes des clients.

En tenant compte de tout ce qui précède, l'objectif de ce projet de recherche est atteint. Cependant, notre projet comporte certaines limites. D'une part, dans ce projet nous avons utilisé le modèle EOQ dans sa forme basique en utilisant la formule de Wilson pour déterminer la quantité économique de commande. En effet, pendant les dernières années beaucoup de chercheurs dans des projets académiques ont essayé d'optimiser la quantité économique de production. Ainsi, il serait peut-être intéressant de comparer ces systèmes avec DDMRP.

D'autre part, la nomenclature utilisée dans ce projet de recherche n'est pas complexe. En effet, tous les projets de recherche (mémoires, thèses et articles) existants incluant le présent utilisent des nomenclatures simples, contrairement aux environnements manufacturiers modernes où les nomenclatures sont complexes et leurs produits finis ont en commun plusieurs semi-finis et plusieurs matières premières. De plus, dans notre étude, la nomenclature comporte une seule branche. Ainsi, tous les articles sont gérés sur buffers. De ce fait, dans ce projet, nous ne pouvons pas étudier la première étape de DDMRP (positionnement stratégique du buffer) qui est son étape fondamentale.

En outre, en point de vue de simulation, certaines hypothèses peuvent présenter des limites de nos modèles. En effet, nous avons supposé que chacun des ateliers possède un nombre fixe de machines et d'opérateurs et que les machines sont fiables au cours de la période de simulation. Ainsi, le système présente un environnement parfait. Généralement, dans une entreprise, des aléas apparaissent qui font en sorte que le nombre de machines et d'opérateurs sont variables.

Dans ce projet, nous n'avons pas considéré les pics qualifiés et leurs effets dans les deux modèles. Ainsi, il sera intéressant d'étudier leurs effets. Aussi, nous suggérons pour les futurs projets d'étudier l'effet d'impliquer la variation du lead time dans le calcul des zones des buffers lors de l'ajustement des buffers. Nous attendons également à un projet de recherche dans lequel DDMRP est appliqué réellement dans une industrie.

## BIBLIOGRAPHIE

- Baptise, P. (2017). DDMRP: scheduling opportunities in case of complex BOMs. 7th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain ILS Conference 2018, Lyon, France.
- Chung, S.H. (2000). ERP adoption: a technological evolution approach. *International Journal of Agile Management Systems*, 2(1), pp. 24-32.
- Cuadra, R.R. (2017). Estudio del DDMRP (Demand Driven Materials Requirement Planning), projet de maître en logistique, Valladolid, Espagne.
- Demand Driven Institute. (2016). Tiré de <http://demanddriveninstitute.com/>.
- Rossetti.D. (2015). *Simulation Modeling and Arena*. John Wiley & Sons, Incorporated. ISBN: 9781118608036.
- Giri, B. C. C., Jalan A. K., and & Chaudhuri, K. S. (2003). Economic Order Quantity model with Weibull deterioration distribution, shortage and ramp-type demand, *International Journal of Systems Science*, 34:4, 237-243, DOI: 10.1080/0020772131000158500.
- Grubbström, R.W., & Erdem, A. (1999). The EOQ with backlogging derived without derivatives. *International Journal of Production Economics*, pp. 529-530.
- Hietikko. J. (2014). Supply Chain Integration with Demand Driven Material Requirement Planning System: Wärtsilä 4-Stroke. Mémoire de maîtrise en management industriel, Université de Vaasa, Finlande.
- Hollocks, B. W. (2005). Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection. *Journal of the Operational Research Society*.
- Ihme, M. (2015). Interpreting and applying Demand Driven MRP, A case study. Thèse de doctorat, université de Nottingham Trent.
- Jiang, J. and & Rim., S. (2016). Strategic Inventory Positioning in BOM with Multiple Parents Using ASR Lead Time. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2016, Article ID 9328371, 9 pages6/93.

- Khana, M., Jaber, M.Y. and & Bonney, M. (2011). An economic order quantity (EOQ) for items with imperfect quality and inspection errors. *International Journal of Production Economics*, volume 133, Issue 1, pp 113-118.
- Kossar, D. (2017). Réserve de capacité de production dans le domaine du traitement de surface pour l'aéronautique. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal.
- Le blog de la performance industrielle tiré du site : <https://blog.fr-techteam.com/25-indicateurs-de-performance-industrielle-pour-les-unites-de-production> consulté le 20 mars 2018.
- McGaughey, R.E., and & Gunasekaran, A. (2007). Enterprise resource planning (ERP): past, present and future. *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*,3(3), pp. 23–35.
- Miclo, R. R., Fontanili, F., M. Luras, M., Lamothe, J., & Milian, B. (2015). MRP vs. Demand-Driven MRP: Towards an Objective Comparison. IESM2015, Séville, Spain
- Miclo, R., Fontanili, F., Luras, M., Lamothe, J., & Milian, B. R. (2015). An empirical study of Demand-Driven MRP. ILS2016, Bordeaux, France.
- Miclo, R., Fontanili, F., Luras, M., Lamothe, J., & Milian, B. R. Miclo, F. Fontanili, M. Luras, J. Lamothe, B. Milian. (2016). An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP. IFAC-Papers OnLine 49-12 1725–1730.
- Milco, R., (2016). Challenging the “Demand Driven MRP” Promises: A Discrete Event Simulation Approach. Thèse de doctorat, Mines d'Albi, France 13.
- Palmatier, G. (2003) Enterprise Sales and Operations Planning: Synchronizing Demand, Supply and Resources for Peak Performance, J Ross Pub, ISBN: 978-1932159004.
- Ptak, C. & Chad, S. (2016). Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP). Industrial Press Inc. ISBN-13: 978-0831135980.
- Ptak, C., & Chad, S. (2011). Orlicky's material requirement planning (3e édition). McGraw-Hill.

- Ronaldi, R., G.K.Yang, G. K., and & P.Chuc. P. (2004). The EOQ and EPQ models with shortages derived without derivatives. *International Journal of Production Economics*, volume 92, Issue 2, pp 197-200.
- Rossetti, M. D. (2015). *Simulation Modeling and Arena*, ISBN 9781118608036 pp. 34-46.
- Shofa, M.J., & Widyarto. W. O. (2017). Effective production control in an automotive industry: MRP vs. demand-driven MRP. *AIP Conference Proceedings* 1855, 020004 doi: 10.1063/1.4985449
- Sullivan, T. T., Reid, R.R. A. and & Cartier, B. (2007). *The TOCICO Dictionary, Theory of Constraints*. International Certification Organization.
- Taylor, L. J. (2002). An Integration Analysis of Material Requirements Planning, Just in Time, and the Theory of Constraints. *Academy of Strategic Management Journal*, 1, 109-121.
- Telford, J. K. (2007). *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Volume 27, Number 3.
- Ulgen, O. M., Black, J. J., Johnsonbaugh, B., and & Klungle, R. (1994). Simulation methodology - a practitioner's perspective. *International Journal of Industrial Engineering, Applications and Practice*, 1(2).
- Velasco-Acosta, A.P. (2016). *L'adoption de l'approche DDMRP pour la planification de la production et de la gestion des stocks de moteurs*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique Montréal.

# **ANNEXE A – TOUTES COMBINAISONS POSSIBLES DES BUFFERS**

		Make = M	Buy = B	Distributed = D		
Variability categories	Low = 1	M10	B10	D10	Short = 0	Lead-time categories
		M11	B11	D11	Medium = 1	
		M12	B12	D12	Long = 2	
	Medium = 2	M20	B20	D20	Short = 0	
		M21	B21	D21	Medium = 1	
		M22	B22	D22	Long = 2	
	High = 3	M30	B30	D30	Short = 0	
		M31	B31	D31	Medium = 1	
		M32	B32	D32	Long = 2	
MOQ application		M10MOQ	B10MOQ	D10MOQ		MOQ application
		M11MOQ	B11MOQ	D11MOQ		
		M12MOQ	B12MOQ	D12MOQ		
		M20MOQ	B20MOQ	D20MOQ		
		M21MOQ	B21MOQ	D21MOQ		
		M22MOQ	B22MOQ	D22MOQ		
		M30MOQ	B30MOQ	D30MOQ		
		M31MOQ	B31MOQ	D31MOQ		
		M32MOQ	B32MOQ	D32MOQ		

Figure A.1 : Les combinaisons possibles des buffers

## ANNEXE B – TOUS LES TYPES DE BUFFERS

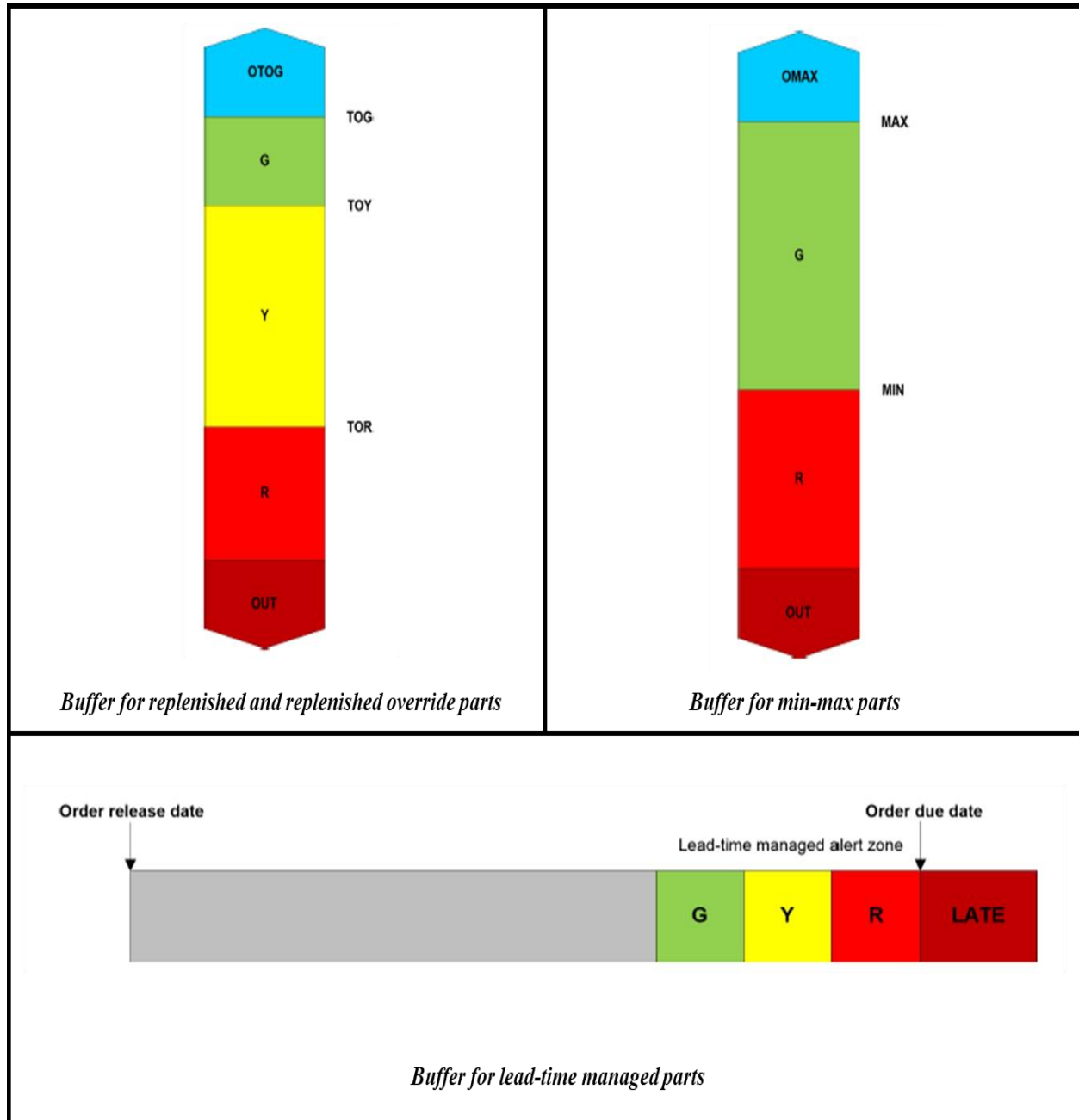


Figure B.1 : Les différents types de buffers

## ANNEXE C – LES TEMPS DE TRAITEMENT DES DIFFÉRENTS POSTES UTILISÉS PENDANT LA SIMULATION

Tableau C.1 : Les temps de traitement des différents postes utilisés pendant la simulation

Atelier	Poste	Opération	Temps en min	Temps par
<b>Atelier 1</b>	Poste 101	Enrouler les tubes	TRIA (15, 17, 20)	Unité
	Poste 102	Séparer les jantes	TRIA (4, 5, 7)	Unité
	Poste 103	Rassembler les jantes	TRIA (0.2, 0.4, 0.4) *22	Lot de 22
		Laver les jantes dans bain d'acide	TRIA (55, 60, 65)	4 lots de 22
		Séparer les jantes après lavage	3 + TRIA (0.2, 0.4, 0.4) * 22	Lot de 22
	Poste 104	Rassembler les jantes	7 + TRIA (0.2, 0.4, 0.4) * 22	Lot de 22
		Mettre en four	TRIA (4, 5, 6)	4 lots de 22
		Faire un traitement thermique	TRIA (110, 120, 130)	4 lots de 22
		Ressortir du four	TRIA (4, 5, 6)	4 lots de 22
		Séparer les jantes	3 + TRIA (0.2, 0.3, 0.4) * 22	Lot de 22
	Poste 105	Souder les extrémités	TRIA (10, 12, 15)	Unité
	Poste 106	Égaliser la surface	TRIA (7, 9, 10)	Unité
	Poste 107	Rassembler les jantes	5 + TRIA (0.2, 0.3, 0.4) * 22	Lot de 22
		Teinter les jantes	TRIA (55, 60, 65)	4 lots de 22
		Séparer les jantes	3 + TRIA (0.2, 0.3, 0.4) * 22	Lot de 22
<b>Atelier 2</b>	Poste 201	Usiner la surface	TRIA (15, 17, 20)	Unité
	Poste 202	Percer les trous	TRIA (10, 12, 15)	Unité
<b>Atelier 3</b>	Poste 301	Assembler les composants	TRIA (12, 15, 20)	Unité
	Poste 302	Serrer les rayons	TRIA (8, 10, 13)	Unité
	Poste 303	Inspecter les tensions des rayons	TRIA (5, 7, 9)	Unité

## ANNEXE D – LES TEMPS DE SET UP DES DIFFÉRENTS POSTES

Tableau D.1 : Les temps de set up des différents postes

Atelier	Poste	Type de processus	Machine utilisée	Temps min
<b>Atelier 1</b>	Poste 101	Semi-automatique	Plieuse de métal	TRIA (6,7,8)
	Poste 102	Semi-automatique	Dispositif de découpe	TRIA (4,5,6)
	Poste 103	Semi-automatique	Bain d'acide	
	Poste 104	Semi-automatique	Four	F (état du four) *
	Poste 105	Semi-automatique	Poste de soudage	TRIA (5,6,8)
	Poste 106	Semi-automatique	Dispositif de lissage	TRIA (6,7,8)
	Poste 107	Semi-automatique	Bain de teinte	TRIA (15,20,30)
<b>Atelier 2</b>	Poste 201	Semi-automatique	Machine de CNC	TRIA (4,6,8)
	Poste 202	Semi-automatique	Perceuse	TRIA (5,10,15)
<b>Atelier 3</b>	Poste 301	Manuel		
	Poste 302	Manuel		
	Poste 303	Semi-automatique	Machine de réglage des tensions	TRIA (8,12,15)
	Poste 304	Manuel		

\*le temps de setup est une fonction qui dépend de l'état du four. Elle est expliquée dans l'annexe E.

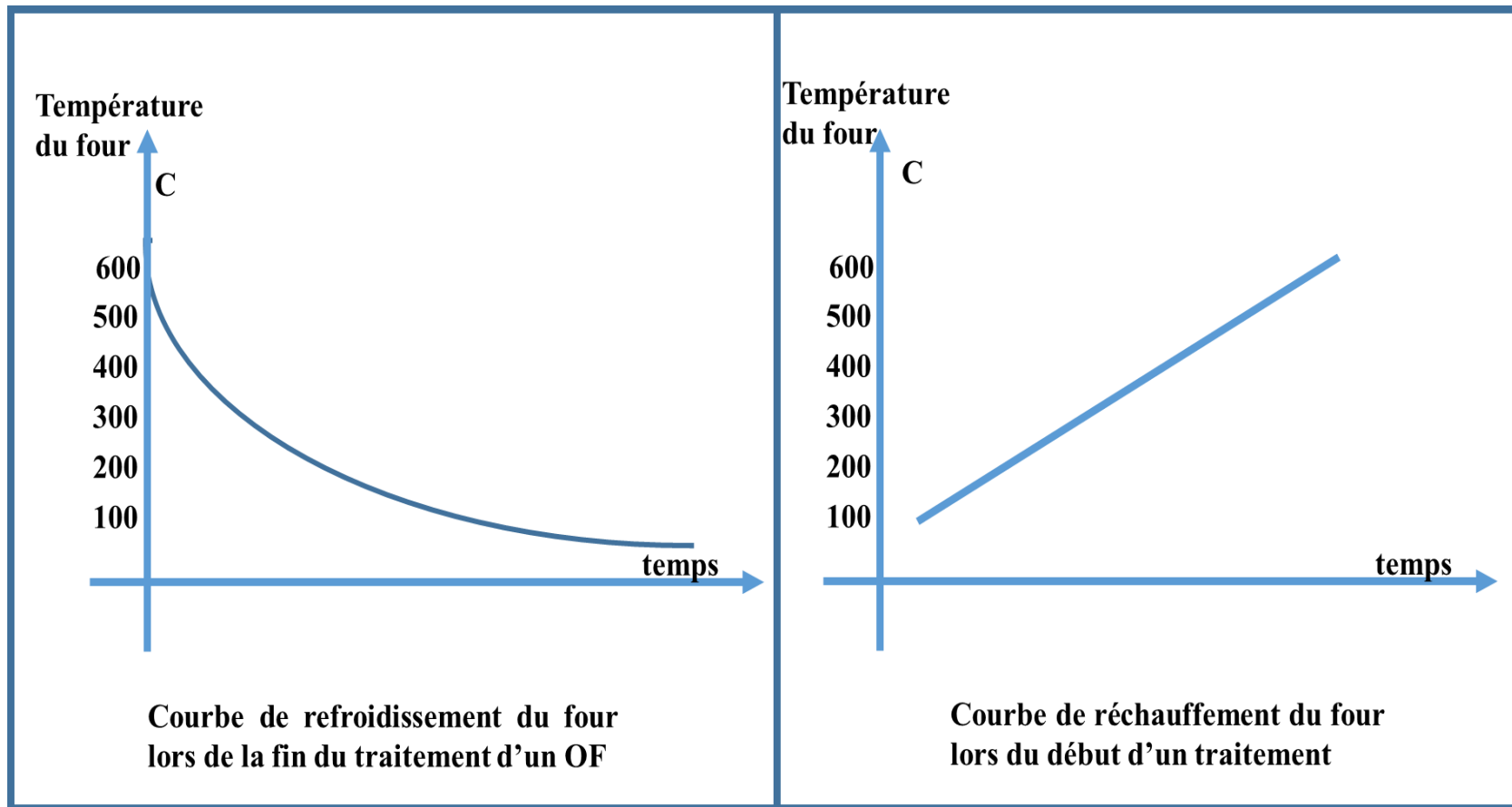
**ANNEXE E – COURBES ÉTAT DE FOUR**

Figure E.1 : Les courbes de refroidissement du réchauffement du four

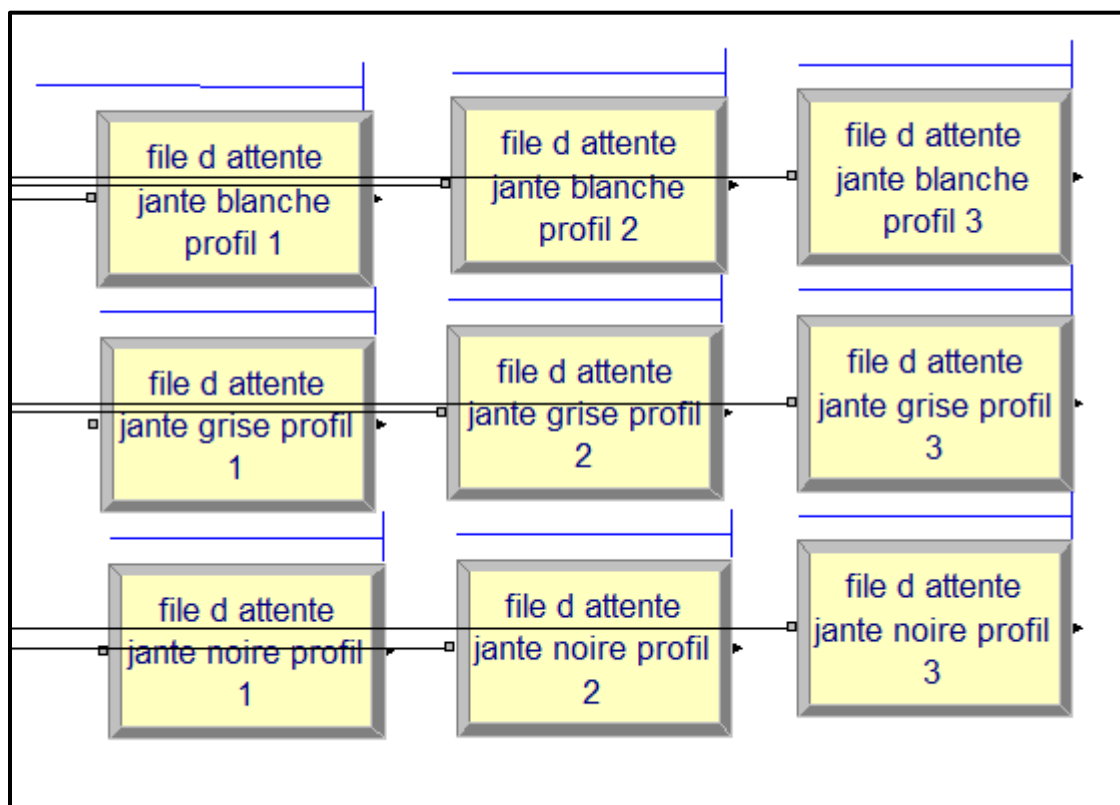
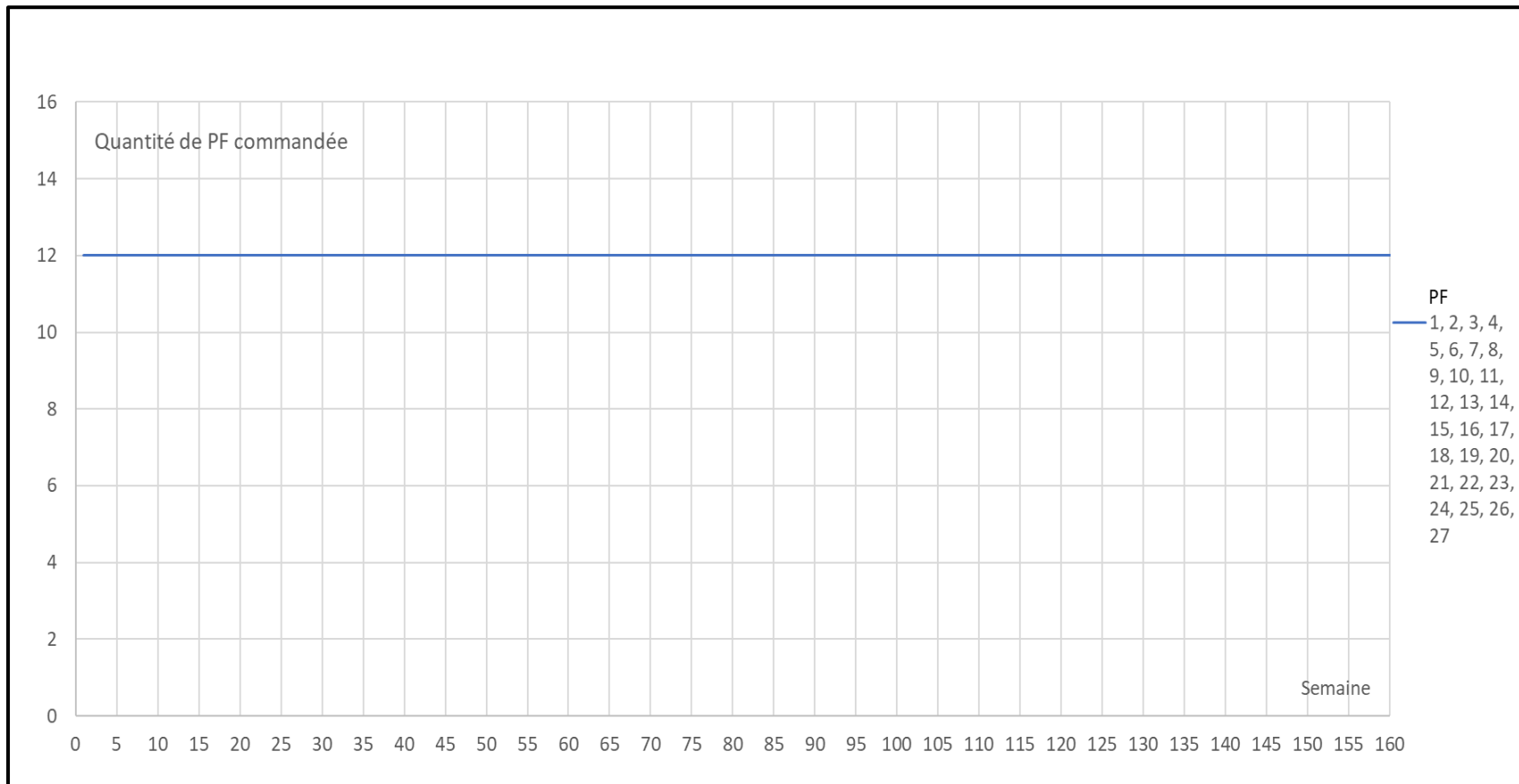
**ANNEXE F – FILES D’ATTENTE DES LOTS LORS DE LA CRÉATION**

Figure F.1 : Capture d'écran des files d'attente des lots lors de la création

## ANNEXE G – EXEMPLES D’UN SCÉNARIO DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE

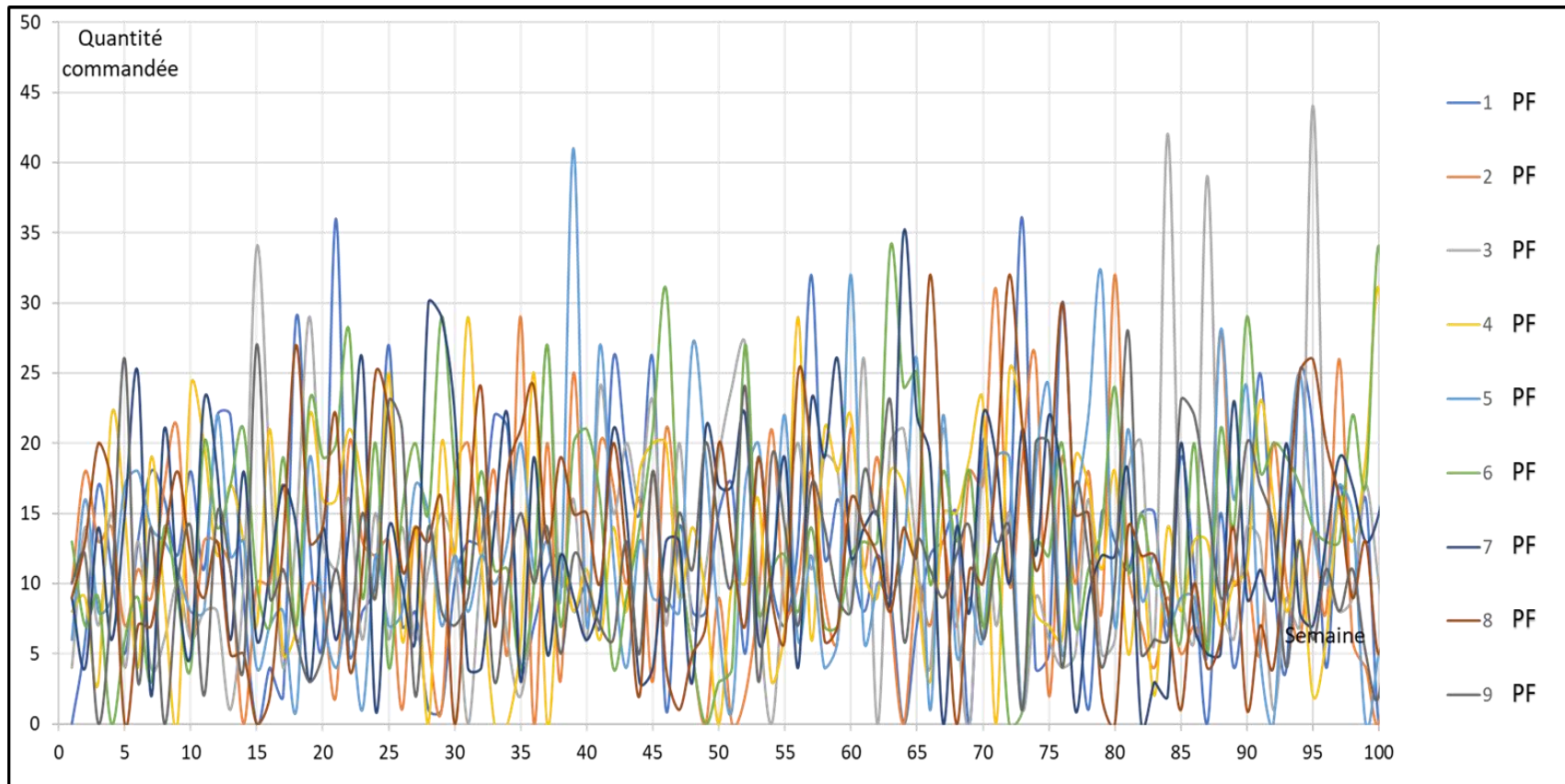


(Quantités commandées par produit fini)

Dans ce scénario, tous les courbes sont confondus sur la même droite (quantité commandée égale à 12 pièces)

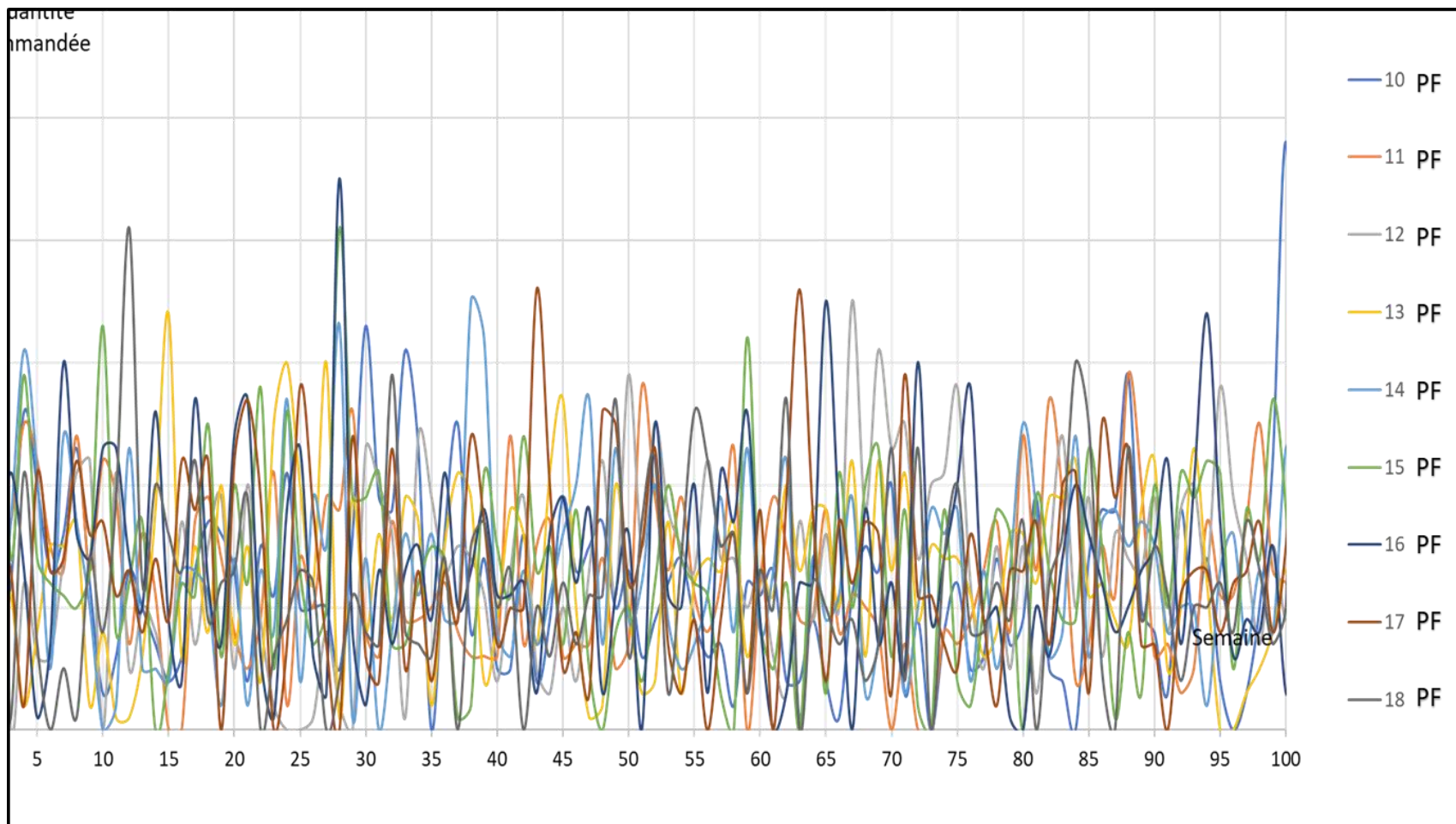
Figure G.1 : Exemple d’un scénario de la première expérience

## ANNEXE H – EXEMPLE D’UN SCÉNARIO DE LA DEUXIÈME EXPÉRIENCE



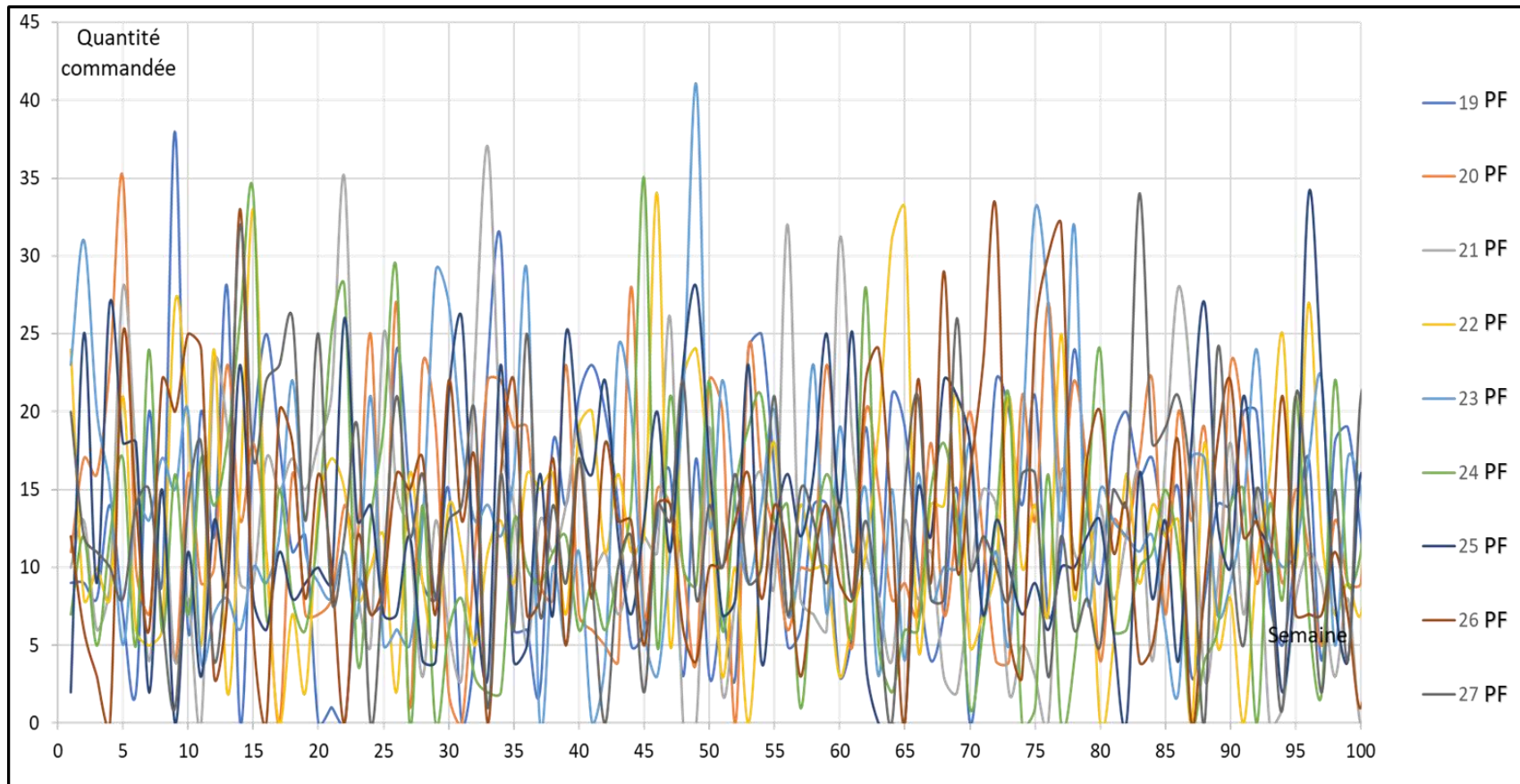
(Quantités commandées par produit fini, PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9)

Figure H.1 : Exemple d’un scénario de la deuxième expérience (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9)



(Quantités commandées par produit fini, PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18)

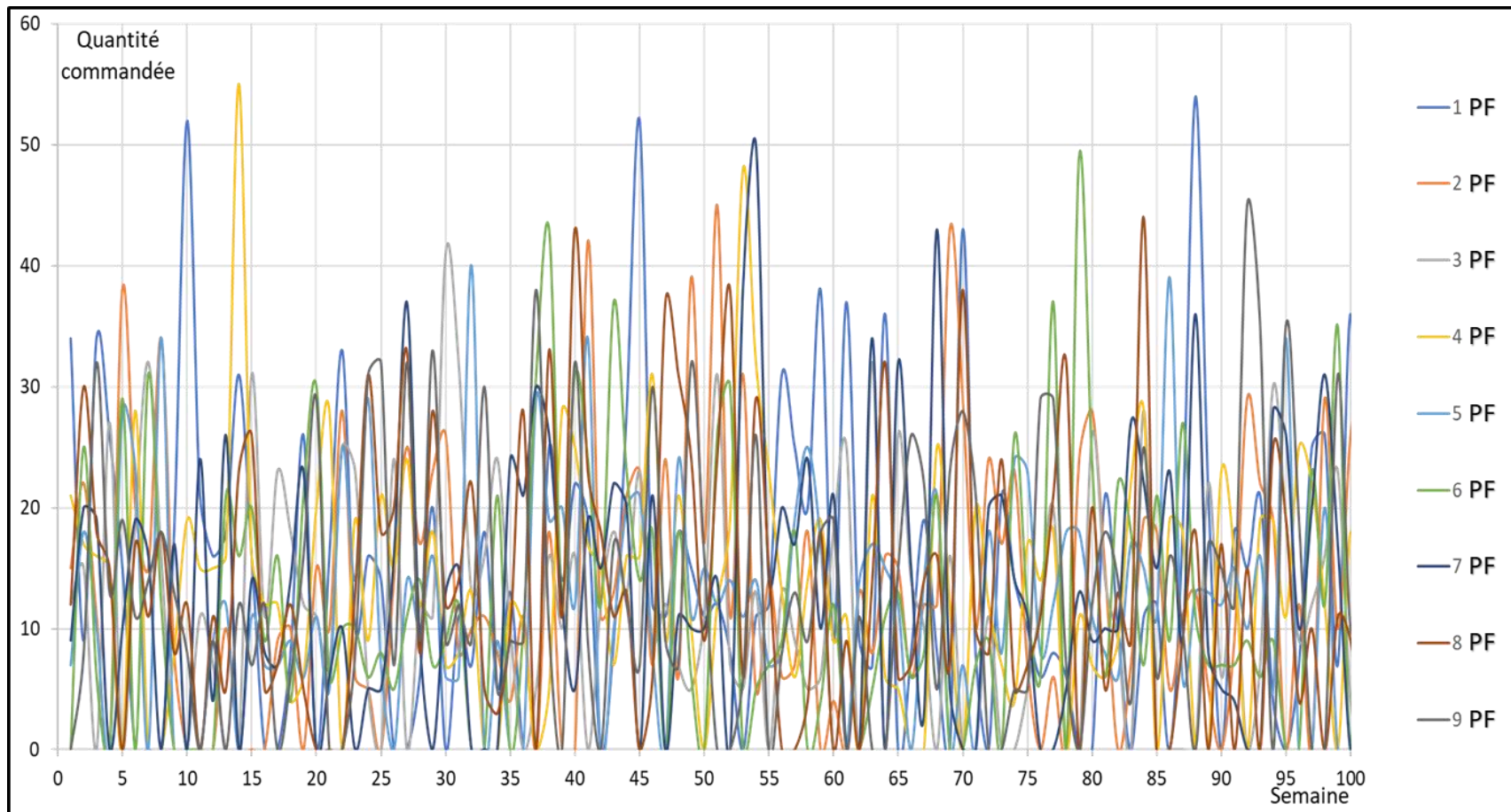
Figure H.2 : Exemple d'un scénario de la deuxième expérience (PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18)



(Quantités commandées par produit fini, PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27)

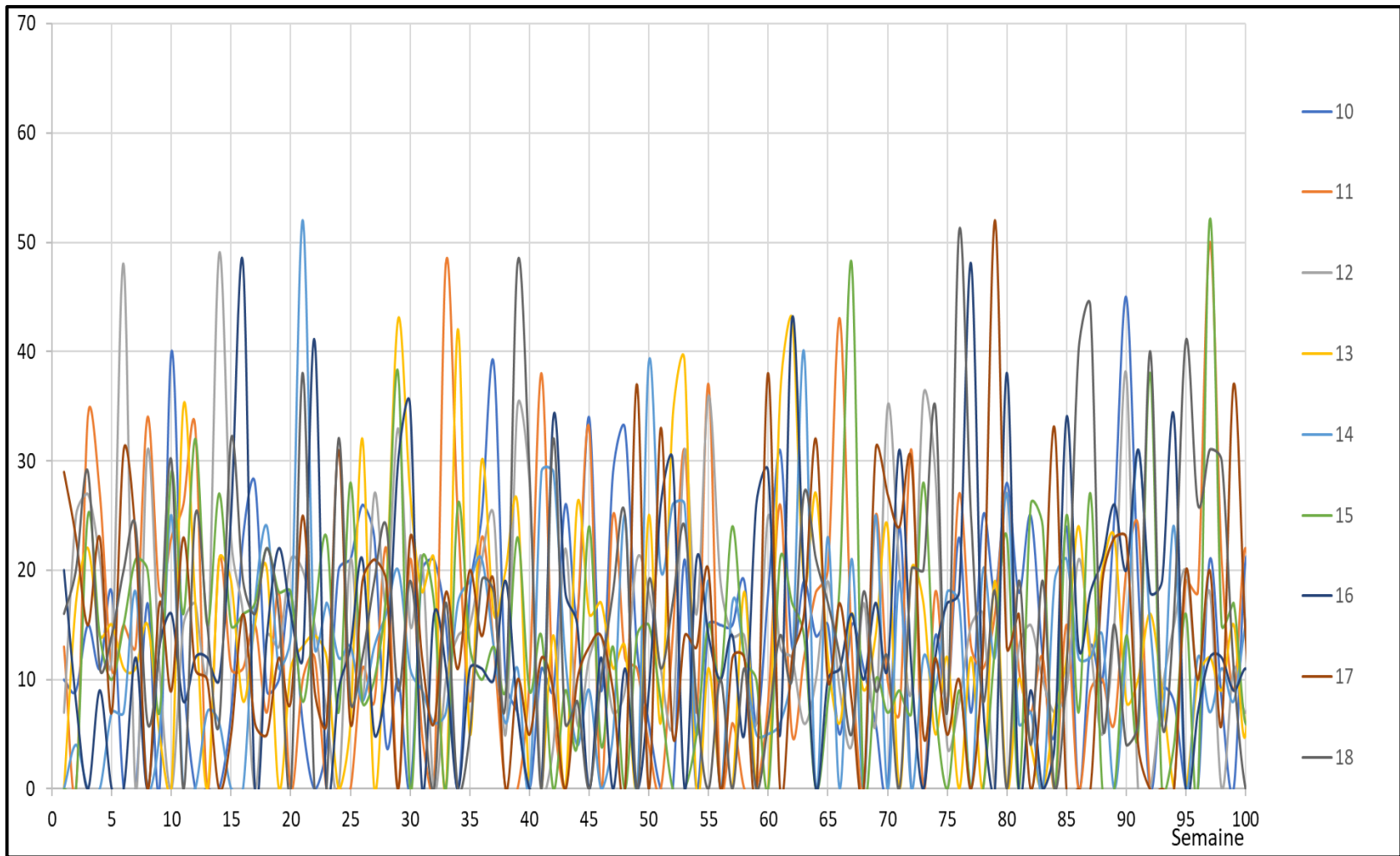
Figure H.3 : Exemple d'un scénario de la deuxième expérience (PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27)

## ANNEXE I – EXEMPLE D'UN SCÉNARIO DE LA TROISIÈME EXPÉRIENCE



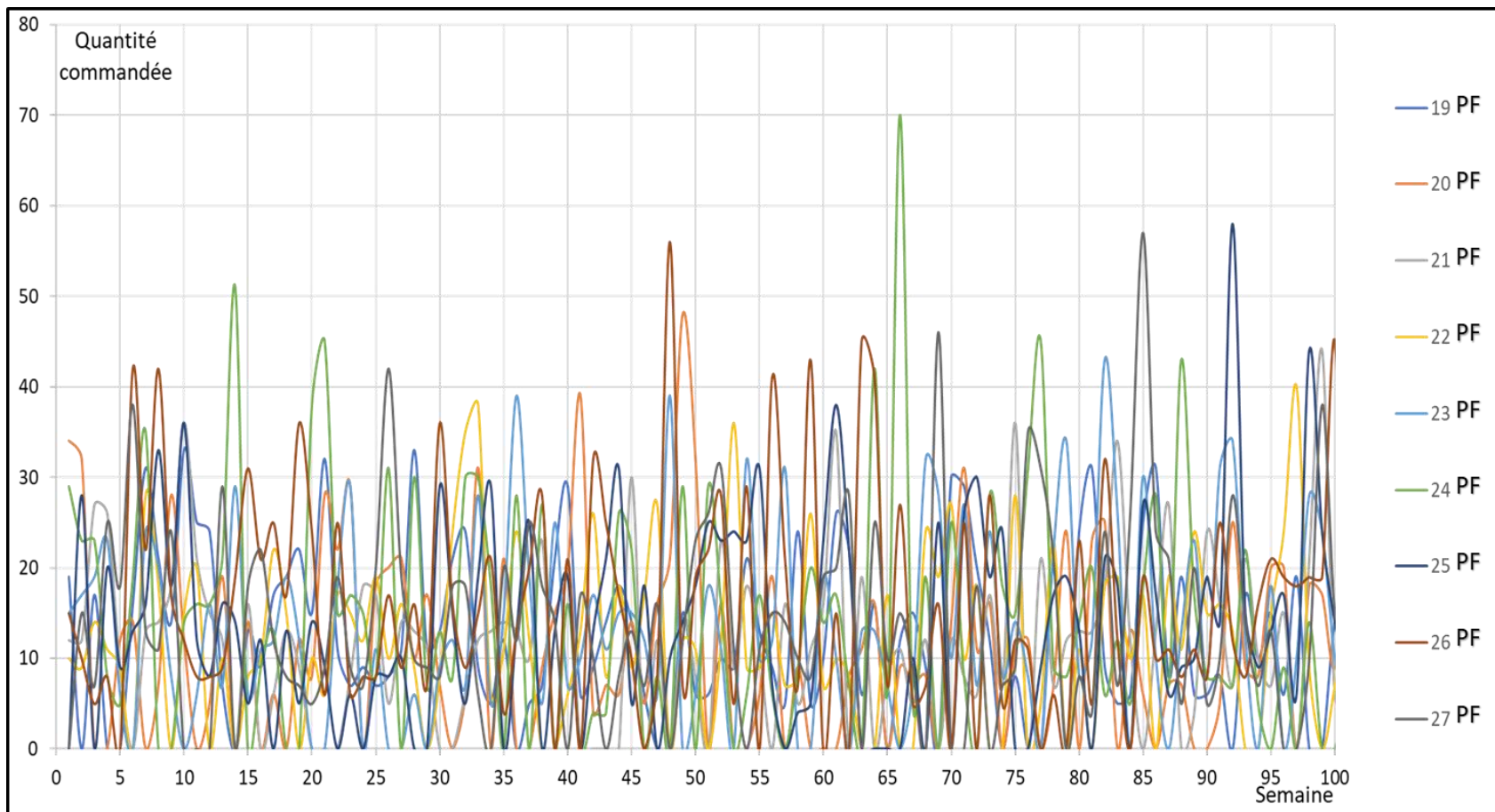
(Quantités commandées par produit fini, PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9)

Figure I.1 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF1, PF2, PF3, PF4, PF5, PF6, PF7, PF8, PF9)



(Quantités commandées par produit fini, PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18)

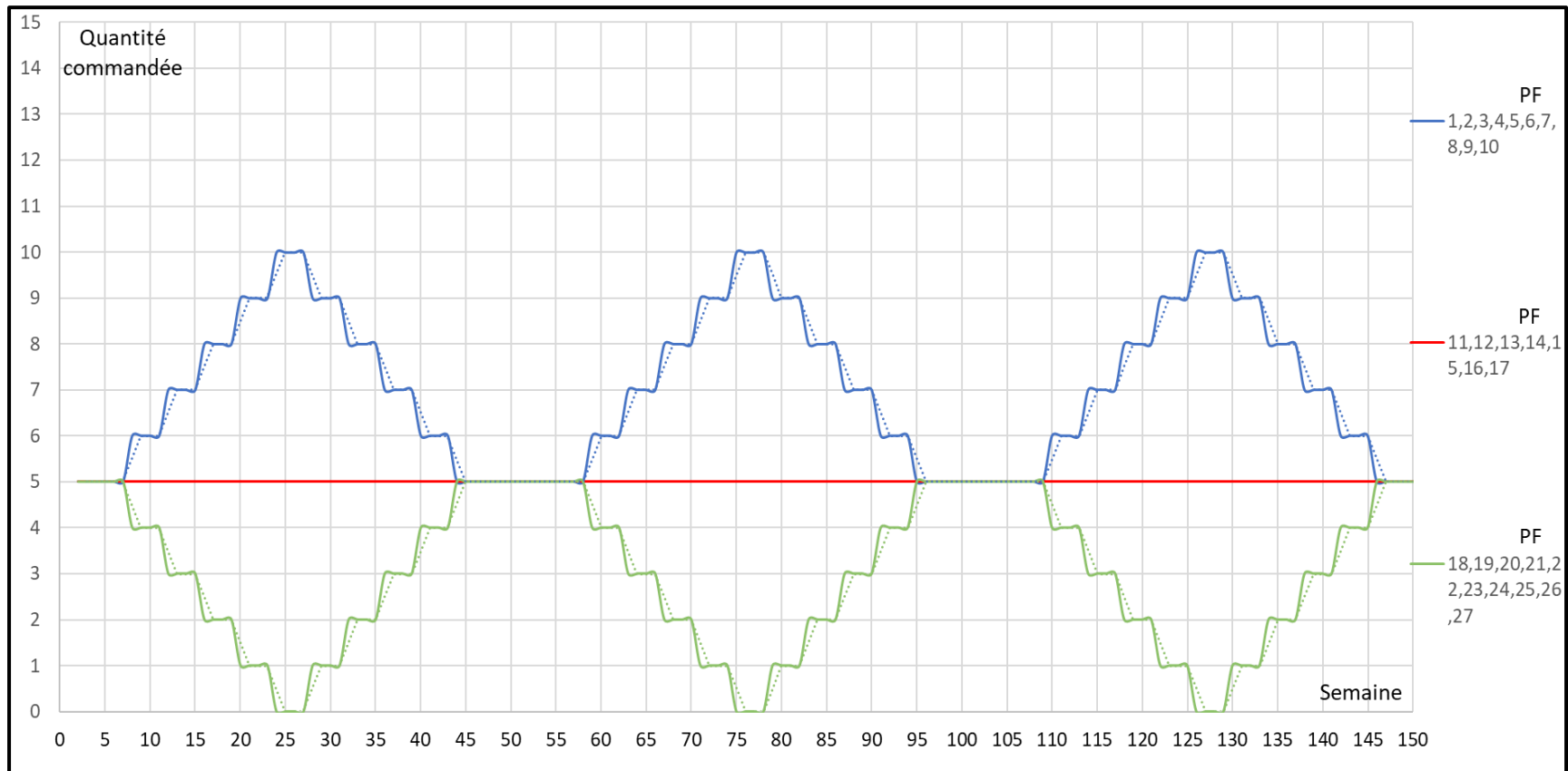
Figure I.2 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF10, PF11, PF12, PF13, PF14, PF15, PF16, PF17, PF18)



(Quantités commandées par produit fini, PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27)

Figure H.3 : Exemple d'un scénario de la Troisième expérience (PF19, PF20, PF21, PF22, PF23, PF24, PF25, PF26, PF27)

## ANNEXE J – EXEMPLE D’UN SCÉNARIO DE LA QUATRIÈME EXPÉRIENCE



(Quantités commandées par produit fini)

Figure J.1 : Exemple d'un scénario de la quatrième expérience