

Louvain School of Management

Comparaison entre le MRP et DDMRP : Analyse théorique et expérimentale des performances de planification

Auteur : Yanis Ouarghi

Promoteur : Jean-Sébastien Tancrez

Année académique 2025-2026

Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le master d'ingénieur de
gestion à finalité spécialisée

Horaire de jour

DECLARATION

La déclaration ci-dessous est **obligatoire et doit apparaître à la première page (après la couverture) de votre TFE**

DECLARATION D'UTILISATION D'IA GÉNÉRATIVE

Confirmez soit les quatre premières déclarations, soit, le cas échéant, la dernière :

Déclarations relatives à l'usage responsable de l'IA générative	Réponse
Le contenu de mon/notre TFE est mon/notre production originale, même si j'ai/nous avons utilisé l'IA générative pour m'/nous aider à le préparer.	☒ oui ☐ non
Je/nous maîtrise/maîtrisons les théories, outils et méthodes que j'utilise/nous utilisons pour le mémoire.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons vérifié que le contenu présenté dans le mémoire est exact et valide, et qu'il ne contient ni hallucination, ni fausse référence, etc.	☒ oui ☐ non
J'atteste/nous attestons maîtriser le résultat final et être capable(s) de l'expliquer et de répondre aux questions à son sujet.	☒ oui ☐ non
J'ai/nous avons pris toutes les mesures nécessaires afin de ne pas donner accès à des informations ou données confidentielles à des outils d'IA générative	☒ oui ☐ non

SIGNATURE

Signez votre déclaration

Auteur Nom de famille, prénom(s)	Date	Signature
1 Ouarghi Yanis	30/07/2026	

NOTE

ChatGPT et Claude ont été utilisés pour corriger la grammaire et l'orthographe, et pour reformuler certains passages dans un style plus académique. Le texte de départ vient de l'auteur, l'intelligence artificielle n'étant intervenue que sur la formulation. Les éléments repris d'autres travaux sont cités dans le texte et listés dans la bibliographie.

L'intelligence artificielle générative a par ailleurs assisté l'auteur dans la rédaction du programme de simulation et dans son débogage. L'auteur en a défini le modèle, les paramètres et les règles de pilotage, et il a relu, exécuté et vérifié l'ensemble.

Résumé

Une entreprise qui livre depuis son stock doit acheter et produire avant de savoir ce qui sera vendu. Deux méthodes s'opposent sur la façon de le faire. Le Material Requirements Planning (MRP) déduit tous ses approvisionnements d'une prévision de la demande finale. Le Demand Driven MRP (DDMRP) renonce à cette prévision et maintient des stocks, appelés buffers, à quelques points choisis de la chaîne, reconstitués au rythme de la consommation observée. La littérature s'accorde à dire que le meilleur choix dépend du comportement de la demande et de la longueur des délais fournisseurs, sans dire de combien ni à partir de quel niveau de perturbation. Ce mémoire mesure ces deux inconnues.

Une chaîne logistique de 6 articles, dont deux produits finis aux profils opposés, est simulée jour par jour sur 60 semaines, dont les 52 dernières sont mesurées. Les deux méthodes reçoivent exactement la même demande et sont réglées au mieux des règles admises sur un scénario de référence. Ces conditions sont ensuite dégradées un facteur à la fois, la variabilité de la demande, la fréquence des commandes exceptionnelles, l'allongement du délai le plus long, la saisonnalité, puis les quatre ensemble, sans qu'aucun réglage soit retouché. Chaque résultat est la moyenne de vingt répliques.

La variabilité de la demande, seule, ne met pas le MRP en difficulté : il maintient son service et reste le moins cher des deux. Il décroche dès qu'un second facteur s'y ajoute, et son service chute nettement quand les quatre se cumulent. Le DDMRP garde au contraire un service élevé dans toutes les situations testées, et il devient le moins cher sous saison et sous stress, ses stocks revenant à moins que les ruptures du MRP. La bascule tient à la nature de la protection : le MRP en fige la taille, le DDMRP fige seulement la règle qui la calcule.

Aucune méthode ne domine partout. Le MRP reste le moins cher tant que la demande est prévisible, le DDMRP protège le service dès qu'elle ne l'est plus, et cinq tests de robustesse le confirment ; la hiérarchie des coûts, elle, dépend du prix d'une rupture.

Remerciements

Mes remerciements vont à mon promoteur, le Professeur Jean-Sébastien Tancrez, pour la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Ses remarques ont orienté les choix de ce mémoire dans les moments d'hésitation. Il a répondu aux courriels avec une rapidité constante, accordé chaque réunion demandée, et relu les premiers jets en renvoyant des retours précis.

Table des matières

Table des figures	vii
Table des tableaux	viii
1. Introduction.....	1
Partie théorique	2
2. Théorie du MRP	2
2.1 Principes fondamentaux	2
2.2 Fonctionnement	3
2.3 Les politiques de lotissement (lot-sizing)	6
2.3.1 Lot-For-Lot, L4L	6
2.3.2 Period Order Quantity, POQ	6
2.3.3 Economic Order Quantity, EOQ	6
2.4 Conditions de performances	8
2.5 Limites	8
3. Théorie du DDMRP	10
3.1 Positionnement stratégique des stocks	11
3.1.1 Le temps de tolérance du client	11
3.1.2 La variabilité de la demande et de l'approvisionnement	11
3.1.3 La flexibilité et l'utilisation des composants	11
3.1.4 La protection des goulots d'étranglement	12
3.1.5 Exemple d'une chaîne bufferisée	12
3.2 Dimensionnement des zones du buffer	12
3.2.1 La zone jaune	13
3.2.2 La zone verte	13
3.2.3 La zone rouge	14
3.3 Pilotage au quotidien	14
3.3.1 Calcul du flux disponible (NFP)	15
3.3.2 Order Spike	15
3.3.3 Seuils d'alerte et génération des commandes	16
3.3.4 Hybridation avec le MRP	16
3.4 Conditions de performances	16
3.5 Limites	18
4. Conclusion des 2 méthodes	18
Partie pratique	19
5. Démarche expérimentale	19
5.1 De la théorie à l'expérimentation	19
5.2 Le dispositif : ce que nous allons faire	20
5.2.1 Une chaîne logistique virtuelle	20
5.2.2 Une même demande pour les deux méthodes	20
5.2.3 Vingt répliques et huit semaines de rodage	20
5.2.4 Les règles de mesure	21
5.3 Questions de recherche et démarche	21
6. La simulation : une chaîne logistique, deux pilotes	22
6.1 Le scénario de référence	22
6.2 Le paramétrage du MRP	25
6.3 Le paramétrage du DDMRP	26
6.4 Les indicateurs qui arbitrent la comparaison	28
6.5 Le plan des expériences	28
6.6 Explication du code	29
7. Résultats des expériences	30

7.1 Le scénario de référence : les premiers résultats	31
7.2 E1. La variabilité seule : le MRP tient.....	32
7.3 E2. Les commandes exceptionnelles : le premier décrochage	33
7.4 E3. Le délai du composant critique : l'erreur qui porte plus loin	34
7.5 E4. La saisonnalité : quand la moyenne elle-même se met à bouger	34
7.6 E5. Le stress combiné : tout à la fois	36
8. Synthèse : quelle méthode pour quel environnement ?	37
9. La robustesse des conclusions	37
10. Les limites du modèle	39
11. Conclusion générale	39
Références bibliographiques	41
Annexe 1 : calcul des tailles de lot et des intervalles de commande.....	42
Annexe 2 : calcul détaillé des zones des buffers DDMRP	45
Annexe 3 : sensibilité au profil de PF1, un produit stable devenu volatil	51
Annexe 4 : sensibilité au profil de PF1, des pics sur les deux produits	52
Annexe 5 : résultats détaillés des tests de robustesse	53

Table des figures

Figure 1 : Éclatement des besoins niveau par niveau : les quantités à lancer en fabrication d'un article deviennent les besoins bruts de ses composants (adapté de Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005).	5
Figure 2 : Structure d'une grille de calcul MRP et lecture de chaque ligne (adapté de Vollmann et al., 2005).....	6
Figure 3 : Arbitrage entre coût de possession et coût de passation : la quantité économique de commande minimise le coût total (adapté de Silver et al., 1998).	7
Figure 4 : Deux buffers découpent la chaîne : le délai découplé du produit fini s'arrête au premier buffer rencontré (adapté de Ptak & Smith, 2016).	12
Figure 5 : Les 3 zones d'un buffer, le rôle de chacune et leurs calculs de dimensionnement (adapté de Ptak & Smith, 2016).	13
Figure 6 : Le pilotage quotidien d'un buffer : calcul du flux disponible et comparaison aux trois zones pour décider s'il faut commander (adapté de Ptak & Smith, 2016).	16
Figure 7 : La nomenclature simulée, avec les délais et les coefficients de lien.	22
Figure 8 : La double boucle du programme, une expérience à cinq niveaux jouée sur vingt réplifications ; les couleurs renvoient aux passages du texte qui décrivent chaque fonction.	30
Figure 9 : Sensibilité aux stocks de sécurité du MRP, à partir du scénario de référence (environnement inchangé) ; SS des produits finis multipliés de $\times 1$ (40 et 90 unités) à $\times 4$, DDMRP de référence en repère. Moyennes de vingt réplifications.....	32
Figure 10 : Expérience E1, six niveaux de variabilité croissante sans commandes exceptionnelles ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt réplifications.....	33
Figure 11 : Expérience E2, fréquence des commandes exceptionnelles de PF2 de 0 à 12 % par jour, cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt réplifications.	34
Figure 12 : Expérience E3, délai d'achat de C1 de 10 à 30 jours ouvrés, cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt réplifications.	34
Figure 13 : Expérience E4, amplitude de la saison de 0 à ± 40 % (période de 26 semaines), cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt réplifications.....	35
Figure 14 : L'expérience E4 rejouée à l'identique avec, en plus, un MRP à prévision saisonnière et stocks de sécurité indexés sur la saison ; moyennes de vingt réplifications.....	36
Figure 15 : Expérience E5, intensité du stress de 0 % (référence) à 100 % (variabilité forte, pics fréquents, délai de 30 jours et saison ± 30 % simultanés), cinq niveaux ; moyennes de vingt réplifications.	37

Table des tableaux

Tableau 1 : Ce que la théorie laisse attendre de chaque méthode selon l'environnement, mis à l'épreuve dans la partie pratique.....	19
Tableau 2 : Paramètres de la chaîne simulée dans le scénario de référence. Le coût de rupture ne s'applique qu'aux produits finis, seuls articles exposés à la demande des clients.....	24
Tableau 3 : Paramètres de la demande des deux produits finis dans le scénario de référence.	24
Tableau 4 : Le paramétrage MRP du scénario de référence.	26
Tableau 5 : Le paramétrage DDMRP du scénario de référence. Le calcul complet des zones figure en Annexe 2.	27
Tableau 6 : Résultats du scénario de référence, moyennes de vingt répliques. Le coût plus faible du MRP s'accompagne d'un service nettement inférieur.	31
Tableau 7 : Matrice de décision issue des cinq expériences.	37
Tableau 8 : Effet de cinq changements d'hypothèse sur les conclusions du chapitre.....	38

1. Introduction

Un client qui commande un produit accepte rarement d'attendre le temps qu'il faut pour le fabriquer (Ptak & Smith, 2016). Or, entre l'achat des matières, la production et la livraison, il s'écoule souvent plusieurs semaines (Chopra & Meindl, 2015). Quand le délai que le client accepte est plus court que ce temps de fabrication, l'entreprise doit acheter et produire avant de savoir ce qui sera vendu, puis livrer depuis son stock (Chopra & Meindl, 2015). C'est cette situation, la production sur stock, qu'étudie ce mémoire. Ces décisions anticipées ont un coût dans les deux sens (Silver et al., 1998). Trop anticiper immobilise de l'argent dans des stocks qui dorment, pas assez anticiper laisse des clients non servis (Silver et al., 1998).

Décider à l'avance suppose d'estimer la demande à venir (Chopra & Meindl, 2015). Cette estimation, appelée prévision, n'est pas également fiable partout (Chopra & Meindl, 2015). Certaines entreprises vendent des quantités régulières, faciles à anticiper (Chopra & Meindl, 2015). D'autres font face à une demande qui change d'une semaine à l'autre, à des commandes inattendues ou à des fournisseurs lents et irréguliers, et l'estimation s'y trompe souvent (Christopher & Peck, 2004 ; Lee et al., 1997). Le comportement de la demande et celui des délais fournisseurs, leur longueur comme leur variabilité, forment ce que ce mémoire appelle l'environnement d'une entreprise, et c'est de lui que dépend la façon d'organiser les approvisionnements.

La méthode la plus répandue est le Material Requirements Planning (MRP), formalisé par Orlicky (1975). Elle repose entièrement sur la prévision (Orlicky, 1975). L'entreprise estime ses ventes futures, en déduit les composants nécessaires et les commande assez tôt pour couvrir les délais (Vollmann et al., 2005). Une réserve, appelée stock de sécurité, absorbe les écarts entre la prévision et les ventes réelles (Silver et al., 1998). La limite de la méthode tient à cette réserve, dont la taille est fixée une fois pour toutes (Ptak & Smith, 2016). Si la demande s'éloigne durablement de ce qui était prévu, cette réserve ne suffit plus, et l'erreur se répercute sur tous les composants (Lee et al., 1997 ; Disney & Towill, 2003).

Une méthode plus récente, le Demand Driven MRP (DDMRP), fait le pari inverse (Ptak & Smith, 2016). Plutôt que d'anticiper la demande, elle maintient des stocks, appelés buffers, à quelques endroits choisis de la chaîne, et les reconstitue au rythme de ce qui est réellement consommé (Miclo et al., 2019). La taille de ces stocks est recalculée régulièrement à partir de la consommation observée (Ptak & Smith, 2016). Quand la demande change, la protection s'ajuste

donc sans intervention (Ptak & Smith, 2016). En contrepartie, ces stocks sont détenus en permanence, même quand l'environnement est calme et qu'ils ne servent à rien (Miclo et al., 2019).

Chaque méthode a donc son terrain, et la littérature s'accorde à dire que le bon choix dépend de l'environnement (Miclo et al., 2019), sans préciser à partir de quel moment l'une devient préférable à l'autre. La question centrale de cette recherche est la suivante : **dans quelle mesure le choix entre une planification par prévision (MRP) et une planification par la demande (DDMRP) influence-t-il la performance et la résilience d'une chaîne logistique lorsque son environnement se dégrade ?** La performance renvoie ici à la qualité du service rendu aux clients et à ce qu'elle coûte à l'entreprise. La résilience est la capacité d'une méthode à tenir ces résultats quand les conditions se durcissent, sans qu'on retouche ses réglages. On peut s'attendre à ce que le MRP reste le moins coûteux tant que la demande est prévisible, et à ce que le DDMRP protège mieux le service dès qu'elle ne l'est plus. Reste à savoir de combien, et à partir de quel niveau de perturbation le second devient préférable au premier.

Le travail se déroule en deux temps. Une première partie compare les deux méthodes sur le plan théorique, en exposant leurs principes, leurs mécanismes de calcul, les environnements dans lesquels chacune est réputée efficace. Une seconde partie les confronte dans une simulation informatique. Une même chaîne d'approvisionnement y est pilotée tour à tour par chacune des deux méthodes, d'abord dans des conditions favorables, puis dans des conditions de plus en plus difficiles, par exemple une demande qui varie davantage ou des délais de livraison qui s'allongent, afin de mesurer laquelle sert le mieux les clients et à quel coût. Les paramètres de cette simulation s'appuient sur les recommandations de la littérature (Silver et al., 1998 ; Chopra & Meindl, 2015).

Partie théorique

La partie théorique suivante a pour objectif de présenter le fonctionnement des 2 méthodologies ainsi que leurs conditions de performances et limites.

2. Théorie du MRP

2.1 Principes fondamentaux

Le Material Requirements Planning (MRP) est un système de planification des approvisionnements, formalisé par Orlicky (1975) pour accompagner la montée en complexité des usines. Son rôle est de déterminer, pour chaque composant et chaque matière première, les quantités à commander et les dates auxquelles les commander (Orlicky, 1975). Le système repose sur une idée simple : les besoins en composants découlent directement de la demande en produits finis (Orlicky, 1975). Il suffit donc de prévoir cette demande finale, puis de calculer tout le reste

grâce à la nomenclature (bill of materials, BOM), qui décrit les composants nécessaires à chaque produit fini et leurs quantités (Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005). Le MRP suit enfin une logique centralisée : un programme principal organise l'ensemble de la production et ainsi les décisions d'approvisionnement en découlent (Vollmann et al., 2005). Reste à voir comment ce principe se calcule.

2.2 Fonctionnement

Pour comprendre le MRP, le plus simple est de partir du problème qu'il résout. Une entreprise qui assemble un produit doit décider, pour chacun de ses composants et matières premières, combien commander et quand (Orlicky, 1975). La réponse intuitive consisterait à prévoir la demande de chaque article séparément (Orlicky, 1975). C'est précisément ce qu'Orlicky (1975) rejette, en distinguant deux types de demande. **La demande indépendante**, celle des produits finis, provient du marché : elle est incertaine et doit être estimée par des prévisions (Orlicky, 1975). **La demande dépendante**, celle des composants, n'a en revanche rien d'incertain une fois le plan de production connu : si l'entreprise sait combien de produits finis elle fabriquera, elle peut calculer exactement les composants qu'il lui faudra (Orlicky, 1975). Toute la logique du MRP découle de cette idée : ne prévoir que les produits finis, et déduire tout le reste par calcul (Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005).

Le point de départ est donc un plan pour les produits finis : **le programme directeur de production** (*Master Production Schedule, MPS*) fixe semaine par semaine les quantités à produire (Orlicky, 1975). Reste à savoir combien les clients achèteront. Cette demande n'étant pas connue, l'entreprise l'estime : c'est la prévision, qui prolonge la tendance et la saisonnalité observées dans l'historique des ventes (Chopra & Meindl, 2015). S'y ajoute le carnet de commandes, c'est-à-dire, pour chaque semaine du plan, les commandes déjà reçues dont la livraison est attendue à cette date (Vollmann et al., 2005). Il se remplit à mesure que la semaine approche (Vollmann et al., 2005). Pour une échéance lointaine, presque rien n'est encore commandé et seule la prévision donne un chiffre (Vollmann et al., 2005). Pour une échéance proche, l'essentiel des livraisons attendues est déjà commandé (Vollmann et al., 2005). En production sur stock, le programme retient chaque semaine la plus élevée des deux valeurs (Vollmann et al., 2005). Ce qui est commandé forme un minimum à produire (Vollmann et al., 2005). Tant que le carnet reste en dessous de la prévision, c'est elle qui est retenue, parce que l'entreprise estime recevoir encore d'autres commandes pour cette échéance (Vollmann et al., 2005). Le programme directeur donne ainsi une demande datée et chiffrée pour chaque produit fini (Vollmann et al., 2005).

Encore faut-il traduire ce plan en besoins de composants. C'est le rôle de la **nomenclature** (*bill of materials, BOM*), qui décrit niveau par niveau de quoi chaque produit fini est fait, et en quelle quantité (Orlicky, 1975). Grâce à elle, les quantités du programme directeur se convertissent mécaniquement en **besoins bruts** (*gross requirements*) : si une semaine exige 100 produits finis et que chacun contient 2 unités d'un composant, le besoin brut de ce composant s'élève à 200 unités pour cette semaine (Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005).

Ces besoins bruts ne peuvent pas être commandés tels quels, car une partie est déjà couverte (Vollmann et al., 2005). L'entreprise dispose de **stock**, et certaines commandes passées plus tôt doivent encore être livrées : ce sont les **réceptions programmées** (*scheduled receipts*), des arrivées déjà engagées (Vollmann et al., 2005). Le **calcul brut-net** (*netting*) vérifie alors si le stock disponible et les livraisons attendues suffisent à couvrir le besoin brut de la semaine tout en conservant le **stock de sécurité**, cette réserve que l'entreprise garde en cas de demande supérieure aux prévisions ou de retard de livraison (Silver et al., 1998). Si elles n'y suffisent pas, la différence constitue le **besoin net** (*net requirement*), soit la quantité supplémentaire qu'il faut recevoir (Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005). Le MRP répète ce calcul semaine après semaine et détermine à l'avance le stock qui devrait rester à la fin de chacune : le **stock projeté disponible** (**projected available balance**) (Vollmann et al., 2005). Il repère ainsi la première semaine où ce stock tomberait sous le niveau de sécurité, celle où il faudra donc recevoir une quantité supplémentaire (Vollmann et al., 2005).

Une fois le besoin net identifié, deux décisions restent à prendre : quelle quantité commander et quand passer la commande (Vollmann et al., 2005). La quantité dépend de la politique de lotissement retenue, qui détermine si l'on commande exactement le besoin net ou si plusieurs besoins sont regroupés en une seule commande (APICS, 2023) ; ces politiques sont présentées dans la section suivante (2.3). Pour déterminer la date, le MRP part de la semaine où la réception est nécessaire et tient compte du **délai d'obtention** (*lead time*) de l'article : la commande est passée suffisamment tôt pour que l'article arrive au moment prévu (Vollmann et al., 2005). Ce mécanisme est appelé **décalage temporel** (*lead time offsetting*) (Vollmann et al., 2005). **Le délai d'obtention correspond au délai d'achat pour un article acheté et au délai de fabrication pour un article produit en interne** (APICS, 2023). Ces commandes planifiées portent sur plusieurs semaines, mais seules celles arrivées à leur date de lancement sont passées (Orlicky, 1975). Les autres sont recalculées à chaque exécution du MRP, en général hebdomadaire (Vollmann et al., 2005).

Le raisonnement ne s'arrête pas au produit fini. Les quantités à fabriquer sont planifiées à des dates précises, mais leur production nécessite des composants (Orlicky, 1975). Comme l'illustre la Figure 1, les quantités à lancer en fabrication pour un article sont multipliées par les coefficients de la nomenclature afin de déterminer les besoins bruts de ses composants directs. Le même calcul (besoins bruts, besoins nets, lotissement et décalage temporel) est ensuite répété à chaque niveau de la nomenclature, jusqu'aux matières premières (Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005).

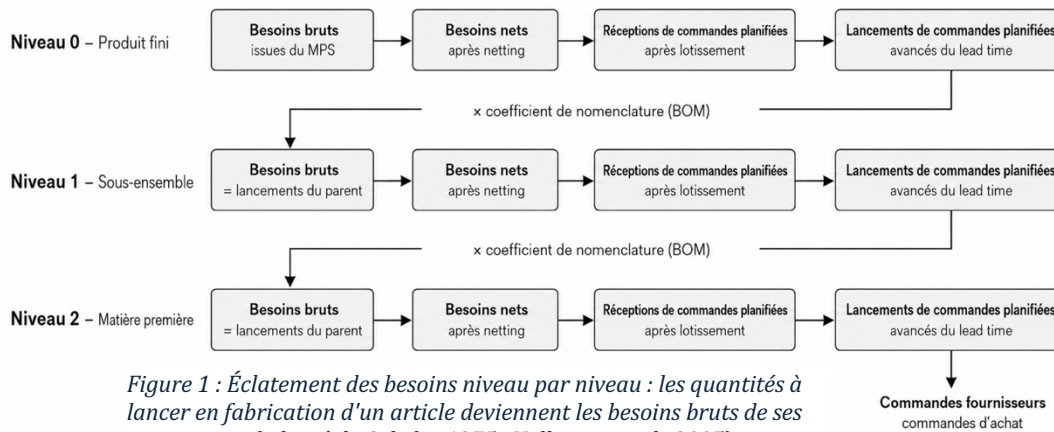


Figure 1 : Éclatement des besoins niveau par niveau : les quantités à lancer en fabrication d'un article deviennent les besoins bruts de ses composants (adapté de Orlicky, 1975 ; Vollmann et al., 2005).

Au terme de cette cascade, l'entreprise dispose d'un échéancier complet : des commandes de fabrication planifiées pour les articles produits en interne et des commandes d'achat planifiées pour ceux achetés auprès des fournisseurs (Orlicky, 1975). Le calcul n'a demandé que quatre informations : le programme directeur, la nomenclature, l'état des stocks et les délais d'obtention (Vollmann et al., 2005).

En pratique, les planificateurs regroupent toutes ces valeurs dans une grille standard, article par article et semaine par semaine (Vollmann et al., 2005), dont la Figure 2 explique la lecture ligne par ligne. C'est cette logique de calcul, répétée pour chaque article et chaque semaine, que le MRP simulé dans la partie pratique appliquera à chaque replanification.

Article : ...	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	...
Besoins bruts <i>Gross requirements</i>					
Réceptions programmées <i>Scheduled receipts</i>					
Stock projeté disponible <i>Projected available balance</i>					
Besoins nets <i>Net requirements</i>					
Réceptions planifiées <i>Planned order receipts</i>					
Commandes planifiées <i>Planned order releases</i>					

Ce que l'article doit fournir chaque semaine : la demande qu'il doit satisfaire.

Ce qui va arriver de toute façon : commandes déjà passées, en cours de livraison.

Ce qu'il restera en stock à la fin de la semaine, une fois les entrées et les sorties comptées.

Ce qu'il manque réellement : le besoin brut moins le stock restant et les réceptions programmées, en tenant compte du stock de sécurité que l'entreprise souhaite conserver.

La réponse du système : ce qu'il propose de recevoir, la quantité prévue à la date de besoin.

La même information, décalée dans le temps en fonction du délai d'obtention : c'est quand il faut passer la commande.

Lecture : les trois premières lignes décrivent la situation (demande, arrivées, stock) ; les trois dernières sont le calcul du MRP (ce qui manque, ce qu'on reçoit, ce qu'on commande).

Figure 2 : Structure d'une grille de calcul MRP et lecture de chaque ligne (adapté de Vollmann et al., 2005).

Restent les politiques de lotissement, évoquées plus haut mais pas encore détaillées.

2.3 Les politiques de lotissement (lot-sizing)

Convertir un besoin net en une quantité à commander n'est pas un geste neutre (Silver et al., 1998). Chaque commande engendre un coût de passation, lié à l'administration, au transport ou au réglage des machines, tandis que chaque unité conservée en stock engendre un coût de possession, lié à l'immobilisation financière, à l'entreposage et au risque d'obsolescence (Silver et al., 1998). Les politiques de lotissement (lot-sizing) sont les règles d'arbitrage entre ces deux coûts, et le choix de l'une d'elles influence directement le niveau des stocks comme la fréquence des commandes (Vollmann et al., 2005). Trois politiques classiques sont retenues dans ce travail.

2.3.1 Lot-For-Lot, L4L

La première, le lot-pour-lot (*lot-for-lot*, L4L), est la plus simple : chaque semaine où un besoin apparaît, on commande exactement ce qu'il manque (Vollmann et al., 2005). Rien ne dort en stock, donc le coût de possession est au plus bas ; mais on commande presque chaque semaine, et les frais de commande s'accumulent (Vollmann et al., 2005). Le L4L convient donc aux articles chers à stocker, ou quand passer commande coûte peu (Silver et al., 1998).

2.3.2 Period Order Quantity, POQ

La deuxième, la quantité par période (*period order quantity*, POQ), ne commande plus chaque semaine, mais à intervalle régulier : on passe une commande toutes les quelques semaines, et cette commande regroupe les besoins de ces semaines-là (APICS, 2023). On commande donc moins souvent, ce qui réduit les frais de commande ; en échange, les quantités des dernières semaines de l'intervalle attendent en stock, ce qui fait monter le stock moyen (Vollmann et al., 2005). L'intervalle se fixe en deux temps. On calcule d'abord la quantité économique (EOQ), la taille de commande la plus avantageuse, expliquée juste après (Vollmann et al., 2005). On divise ensuite cette quantité par la consommation moyenne d'une semaine : le résultat est le nombre de semaines que la commande permet de couvrir, et ce nombre, arrondi à la semaine, devient l'intervalle du POQ (Vollmann et al., 2005).

2.3.3 Economic Order Quantity, EOQ

La troisième, la quantité économique (*economic order quantity*, EOQ), cherche directement la taille de commande la moins chère au total (Silver et al., 1998). Pour une demande donnée sur une période, les deux coûts dépendent de la taille des commandes (Silver et al., 1998). Plus elles sont grosses (Silver et al., 1998), plus le stock moyen est élevé et plus le coût de possession de la période augmente. Mais plus elles sont grosses, moins il faut en passer, et plus le coût de passation de la période diminue (Silver et al., 1998). Les deux varient donc en sens contraire, et leur somme

sur la période forme une courbe en U dont le minimum donne la taille la moins chère (Figure 3) (Silver et al., 1998). Une formule la donne à partir de la demande moyenne, du coût d'une commande et du coût de stockage (détaillée en Annexe 1) (Silver et al., 1998 ; Vollmann et al., 2005). Dès qu'un besoin apparaît, le système commande cette quantité économique plutôt que la quantité exacte manquante (Vollmann et al., 2005). Si le besoin la dépasse, il en commande le multiple juste au-dessus (Vollmann et al., 2005).

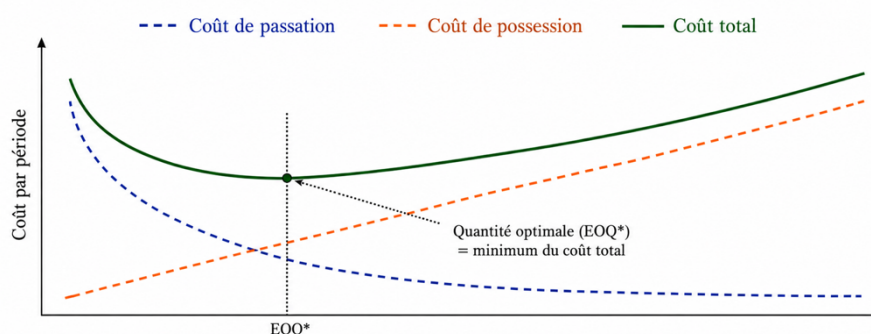


Figure 3 : Arbitrage entre coût de possession et coût de passation : la quantité économique de commande minimise le coût total (adapté de Silver et al., 1998).

Il faut toutefois nuancer la portée de ce résultat, car la formule de l'EOQ a été construite sur une image bien précise du stock (Silver et al., 1998). Elle suppose un stock qui se comporte comme un réservoir : chaque livraison le remplit, puis la demande le vide petit à petit, au même rythme chaque semaine, jusqu'à la livraison suivante (Silver et al., 1998). Dans ce monde régulier, tout se calcule aisément : on sait combien de temps un lot va durer, donc combien de commandes seront passées ; et le stock, qui passe continûment de plein à vide, se maintient en moyenne à la moitié de la taille du lot (Silver et al., 1998). Ce sont ces deux quantités, la fréquence des commandes et le stock moyen, qui alimentent le calcul du coût total présenté plus haut (Silver et al., 1998). Or, dans un calcul MRP, la demande ne vide pas le stock petit à petit : les besoins nets arrivent par à-coups, importants certaines semaines et absents les autres, notamment parce que le lotissement des niveaux supérieurs a déjà regroupé la demande en paquets (Vollmann et al., 2005). Le réservoir ne se vidant plus régulièrement, les quantités sur lesquelles la formule s'appuie ne décrivent plus la réalité, et la quantité « optimale » ne l'est plus qu'approximativement (Silver et al., 1998 ; Vollmann et al., 2005). Appliquée au MRP, l'EOQ doit donc être vue comme une bonne approximation plutôt que comme une solution exacte (Silver et al., 1998 ; Vollmann et al., 2005).

Les trois politiques présentées ici coexisteront au sein du MRP simulé, chacune étant appliquée aux articles pour lesquels elle est la plus adaptée, afin de configurer un MRP aussi performant que possible.

2.4 Conditions de performances

Cette méthodologie du MRP ne tient toutefois ses promesses que sous les 3 conditions principales suivantes (Vollmann et al., 2005).

La première condition est **une demande stable et prévisible** (Vollmann et al., 2005). La raison est simple : tout le calcul part des prévisions faites sur les produits finis (Vollmann et al., 2005). Chaque erreur de prévision au sommet se propage donc, par la nomenclature, à tous les composants en dessous (Vollmann et al., 2005). Plus la demande varie, plus les prévisions risquent d'être éloignées de la réalité (Lee et al., 1997). Des prévisions fausses créent alors des ruptures ou des surplus de stock (Silver et al., 1998). À l'inverse, avec de bonnes prévisions et une méthodologie bien appliquée, le MRP couvre les besoins en composants même pour des nomenclatures très complexes (Orlicky, 1975).

La deuxième condition est d'avoir des **délais d'obtention courts, fixes et connus** (Vollmann et al., 2005). Le MRP lance chaque commande en avance, d'une durée exactement égale au délai de l'article : plus ce délai est court, plus la décision se prend près du besoin, sur une prévision plus fiable (Vollmann et al., 2005). Et si le délai réel dépasse le délai prévu, la livraison arrive trop tard et le calcul perd son sens (Vollmann et al., 2005). Tenir les délais d'achat suppose des fournisseurs fiables et une communication efficace avec eux (Christopher & Peck, 2004). Tenir les délais de fabrication suppose un système de production bien coordonné (Vollmann et al., 2005).

La troisième condition est **l'exactitude des données** (Vollmann et al., 2005). Le calcul repose entièrement sur la nomenclature et sur l'état des stocks (Vollmann et al., 2005). Si le stock enregistré ne correspond pas au stock réel, ou si la nomenclature est fausse, les besoins nets calculés sont faux également (Vollmann et al., 2005).

Ces trois conditions réunies, le MRP atteint un taux de service élevé sans immobiliser beaucoup de stock, **et donc à faible coût de possession** (coût lié au fait de maintenir du stock) (Vollmann et al., 2005 ; Silver et al., 1998).

2.5 Limites

Il existe cependant également des limites dont les 3 principales sont énoncées ci-dessous.

La première limite tient à la prévision, dont le MRP ne peut pas se passer (Vollmann et al., 2005). En pratique, peu de marchés offrent des commandes fermes sur un horizon assez long (Vollmann et al., 2005). La plupart des entreprises qui utilisent le MRP dépendent donc de prévisions

(Vollmann et al., 2005). Or, quand **la demande est volatile**, ces prévisions sont souvent fausses (Christopher & Peck, 2004). **Elles se trompent de deux façons : elles ratent les à-coups et pics d'une demande volatile, et elles suivent avec du retard une demande dont la moyenne augmente ou diminue, par exemple au fil d'une saison**, sauf à utiliser une prévision saisonnière dédiée (Christopher & Peck, 2004 ; Silver et al., 1998). Mettre en place une prévision saisonnière demande cependant au préalable une étude par l'entreprise de sa demande et un historique de vente assez conséquent (Silver et al., 1998). Ainsi, dès que la demande réelle s'écarte du plan, d'une manière ou de l'autre, tout l'échéancier calculé devient faux, car chaque ligne du calcul en découle (Vollmann et al., 2005).

La deuxième limite est **l'amplification des variations par les politiques de lotissement comme l'EOQ ou le POQ** (Lee et al., 1997). En regroupant sur plusieurs semaines les besoins d'un article, elles font qu'on ne le commande plus chaque semaine à hauteur de ce qui en est consommé : le total commandé reste le même, mais il part en une commande importante suivie de semaines sans aucune commande (Lee et al., 1997). Une consommation parfaitement régulière se présente donc au fournisseur comme une demande très irrégulière, et une variation de demande, multipliée par les coefficients de la nomenclature puis arrondie à la taille du lot, arrive au niveau suivant fortement amplifiée (Vollmann et al., 2005). Chaque niveau reçoit ainsi des commandes plus irrégulières que la demande du niveau qu'il approvisionne, et doit stocker davantage pour l'absorber (Disney & Towill, 2003). Cette amplification progressive en remontant la chaîne est **l'effet coup de fouet** (*bullwhip effect*) (Lee et al., 1997).

La troisième limite tient à **la longueur des délais d'obtention**. Une commande doit être lancée d'autant plus tôt que le délai d'obtention de l'article est long, afin que la marchandise arrive la semaine où elle est nécessaire (Vollmann et al., 2005). Décider tôt revient à décider sur une prévision qui porte loin dans le futur, c'est-à-dire sur l'estimation la moins fiable (Silver et al., 1998). Or une erreur commise à cet horizon ne peut plus être rattrapée, puisque la commande est déjà partie (Silver et al., 1998). Si la demande réelle dépasse la prévision, la rupture dure jusqu'à la livraison suivante, et si elle reste en dessous, la quantité arrive quand même et devient du surstock (Silver et al., 1998). Le MRP raisonne en outre sur un délai unique, inscrit dans la fiche de l'article et traité comme certain : si la livraison arrive plus tard que prévu pour cause de variabilité du délai, tout le calendrier bâti sur ce délai se décale à son tour, niveau après niveau (Vollmann et al., 2005). Un délai long éloigne ainsi le moment de la décision de celui de la livraison, et c'est dans cet intervalle que le plan devient faux (Ptak & Smith, 2016).

Ces trois limites ont une même origine : tout le plan est calculé à l'avance à partir d'une prévision, et chaque niveau dépend du précédent (Vollmann et al., 2005). Un écart entre la prévision et la demande réelle ne reste donc jamais local, il se propage à toute la chaîne (Vollmann et al., 2005). C'est ce constat qui a motivé la création du DDMRP, présenté au chapitre suivant (Ptak & Smith, 2016).

3. Théorie du DDMRP

Le Demand Driven MRP (DDMRP), introduit par Ptak et Smith (2016), répond directement à ce constat. Plutôt que de calculer tout un plan à partir d'une prévision, il choisit quelques articles de la nomenclature et y maintient en permanence un stock, appelé **buffer** (Ptak & Smith, 2016). Ce stock change la nature de la dépendance : ce qui se trouve en aval d'un buffer peut être servi immédiatement à partir de lui, sans attendre que la commande remonte toute la chaîne et sans subir ce qui se passe plus haut (Ptak & Smith, 2016). La chaîne se trouve ainsi coupée en segments courts et indépendants, ce qui est **le principe du découplage** (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Chaque jour, l'état de chaque buffer est examiné et une commande n'est lancée que si son niveau est descendu trop bas, d'après la consommation observée et non d'après une prévision (Ptak & Smith, 2016).

On pourrait croire que l'avantage du DDMRP tient à sa seule fréquence, puisqu'il observe la consommation chaque jour là où le MRP recalcule son plan une fois par semaine (Miclo et al., 2019). La différence est pourtant de nature, pas de rythme (Ptak & Smith, 2016). Ce qui protège le service, ce sont les buffers, qui absorbent la variabilité au plus près de la consommation réelle (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Le rythme découle d'ailleurs du découplage : recalculer chaque jour tout un plan MRP ferait changer les commandes planifiées en permanence, alors qu'un buffer isolé se reconstitue sans modifier le reste de la chaîne (Ptak & Smith, 2016). Le pas de temps journalier n'est donc pas un avantage en soi, mais une conséquence de la logique du DDMRP (Ptak & Smith, 2016).

Ptak et Smith (2016) présentent le DDMRP en cinq composantes : le positionnement stratégique des stocks, le dimensionnement des buffers, leurs ajustements dynamiques, la planification pilotée par la demande et l'exécution visible par tous. Pour la clarté du propos, cette section les regroupe en trois étapes. D'abord, choisir où placer les buffers, car en mettre partout coûterait trop cher (Ptak & Smith, 2016). Ensuite, dimensionner chaque buffer, découpé en trois zones aux rôles distincts, et entretenir ces tailles dans le temps (Ptak & Smith, 2016). Enfin, piloter les commandes au quotidien, du calcul du flux disponible jusqu'aux alertes de couleur qui rendent les priorités

visibles de tous (Ptak & Smith, 2016). Un dernier point montrera comment le DDMRP réutilise le calcul MRP pour les articles sans buffer.

3.1 Positionnement stratégique des stocks

Première étape, donc : choisir les emplacements. Un buffer immobilise du stock en permanence ; en placer sur chaque article reviendrait à cumuler les coûts de possession sans réel bénéfice (Ptak & Smith, 2016). Le DDMRP retient donc un petit nombre de points de découplage, choisis selon quatre critères (Ptak & Smith, 2016).

3.1.1 Le temps de tolérance du client

Le premier critère est le temps de tolérance du client : le délai maximal qu'il accepte d'attendre pour être livré (Ptak & Smith, 2016). Face à lui, l'entreprise subit son délai cumulé : la somme des délais d'achat et de fabrication à travers toute la nomenclature (Ptak & Smith, 2016). Si le délai cumulé dépasse la tolérance du client, un buffer placé sur un composant intermédiaire raccourcit le délai perçu par le client : ce composant étant déjà en stock, son achat et sa fabrication ne sont plus à attendre, et il ne reste que les étapes qui le séparent du produit fini (Ptak & Smith, 2016). Le gain est d'autant plus grand si le buffer est placé sur l'article dont le délai pèse le plus lourd dans ce cumul (Ptak & Smith, 2016). Un composant acheté avec un long délai retire à lui seul une part importante de l'attente, là où un article obtenu rapidement n'en retire presque rien (Ptak & Smith, 2016).

Lorsque le client attend une livraison immédiate, sa tolérance est presque nulle : le buffer se place alors directement sur le produit fini, livré aussitôt depuis le stock (Ptak & Smith, 2016). C'est le cas des produits finis en production sur stock, comme ceux de la simulation qui suivra (Ptak & Smith, 2016).

3.1.2 La variabilité de la demande et de l'approvisionnement

Le deuxième critère est la variabilité. Un produit fini dont la demande est très irrégulière mérite un buffer, qui encaissera les commandes chaotiques à sa place (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Le même raisonnement vaut côté fournisseurs : un composant dont le délai d'achat est instable expose l'entreprise à des ruptures, et un buffer l'en protège (Ptak & Smith, 2016 ; Christopher & Peck, 2004).

3.1.3 La flexibilité et l'utilisation des composants

Le troisième critère concerne les composants communs, ceux qui entrent dans plusieurs produits finis différents. Pour rester réactive, l'entreprise pourrait stocker chaque produit fini séparément, mais elle multiplierait les stocks et le risque de produire les mauvaises variantes (Chopra & Meindl, 2015). Placer le buffer sur le composant commun est plus efficace (Ptak & Smith, 2016). L'entreprise pratique alors la différenciation retardée : elle garde son stock sous une forme encore

polyvalente, et n'assemble la variante finale qu'au moment où le client la demande (Chopra & Meindl, 2015). Le stock total diminue, la flexibilité reste entière (Chopra & Meindl, 2015). Encore faut-il que le client accepte d'attendre cet assemblage final (Ptak & Smith, 2016). Si sa tolérance est plus courte que ce délai, la différenciation retardée n'est pas possible et le buffer doit rester sur le produit fini, comme au premier critère (Ptak & Smith, 2016).

3.1.4 La protection des goulots d'étranglement

Le dernier critère vient de l'atelier. Dans une usine, une machine est souvent plus lente que les autres et impose son rythme à toute la production : c'est le goulot d'étranglement (Ptak & Smith, 2016). Chaque heure où cette machine s'arrête faute de pièces est une heure perdue pour l'usine entière, et qui ne se rattrape jamais (Ptak & Smith, 2016). Un buffer de ses composants, placé juste devant elle, garantit qu'elle ne s'arrête jamais par manque de matière (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019).

3.1.5 Exemple d'une chaîne bufferisée

Une fois ces quatre critères appliqués, les buffers sont en place. La Figure 4 en montre le résultat d'ensemble sur une chaîne simple, plutôt que l'effet d'un critère isolé : les deux buffers, l'un sur un composant à long délai, l'autre sur le produit fini, empêchent les perturbations de se propager (Ptak & Smith, 2016). Un retard de livraison ou une hausse brutale de demande est encaissé par le stock du buffer, sans atteindre le reste de la chaîne (Ptak & Smith, 2016). Le schéma introduit aussi une notion qui servira dans toute la suite : **le délai découplé** (*decoupled lead time*), c'est-à-dire le temps d'attente réel d'un article une fois les buffers pris en compte (Ptak & Smith, 2016). Pour le calculer, on additionne les délais en remontant la nomenclature, et l'on s'arrête dès qu'on rencontre un buffer : ce qui est en stock est disponible immédiatement (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019).

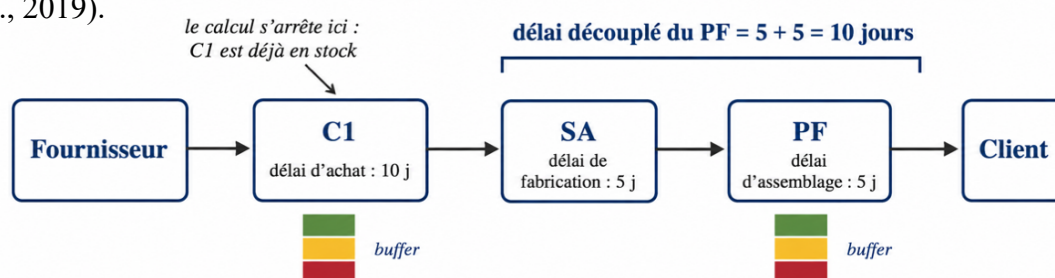


Figure 4 : Deux buffers découpent la chaîne : le délai découplé du produit fini s'arrête au premier buffer rencontré (adapté de Ptak & Smith, 2016).

3.2 Dimensionnement des zones du buffer

Les emplacements étant choisis, deuxième étape : donner une taille à chaque buffer. Un buffer DDMRP n'est pas un simple stock de sécurité, mais un empilement de trois zones colorées, verte, jaune et rouge, chacune avec un rôle précis (Ptak & Smith, 2016). La taille de chaque zone résulte d'un calcul propre, porté à droite de la Figure 5 et détaillé dans les paragraphes qui suivent. Ces

trois zones servent aussi de **seuils**, auxquels le niveau du buffer est comparé chaque jour pour décider s'il faut le réapprovisionner, mécanisme présenté au chapitre 3.3 (Ptak & Smith, 2016).

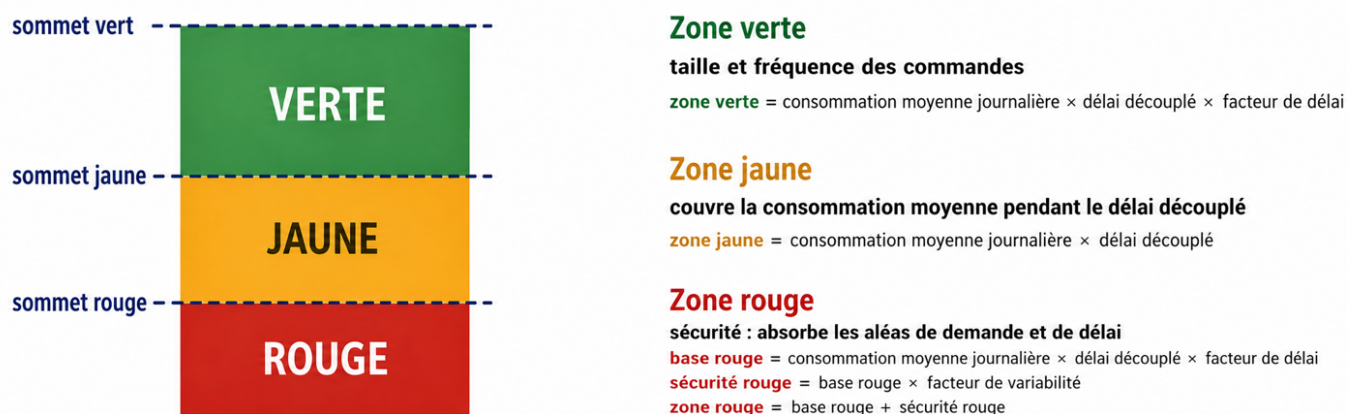


Figure 5 : Les 3 zones d'un buffer, le rôle de chacune et leurs calculs de dimensionnement (adapté de Ptak & Smith, 2016).

3.2.1 La zone jaune

La zone jaune est le stock de travail du buffer : celui dans lequel on puise pour servir la demande courante en attendant qu'une commande de réapprovisionnement reconstitue l'article (Ptak & Smith, 2016). Cette attente dure le délai découplé défini plus haut, et pendant tout ce temps la demande continue de vider le stock (Ptak & Smith, 2016). **Sa taille combine deux éléments. Le premier est la consommation moyenne journalière de l'article sur lequel le buffer est placé (average daily usage, ADU) : la quantité qui en est prélevée chaque jour, en moyenne sur une période passée dont l'entreprise choisit la longueur (Ptak & Smith, 2016). Cette moyenne est recalculée régulièrement et suit ainsi la tendance de la demande (Ptak & Smith, 2016). Le second est la durée de l'attente jusqu'à ce que la commande arrive, le délai découplé (Figure 4) (Ptak & Smith, 2016). On multiplie les deux, et le résultat est la zone jaune : de quoi servir la demande, à son rythme habituel, jusqu'à l'arrivée de la commande de réapprovisionnement (Ptak & Smith, 2016).**

3.2.2 La zone verte

La zone verte représente la taille d'une commande de réapprovisionnement (Ptak & Smith, 2016). Le lien avec un seuil est le suivant : chaque commande cherche à ramener le buffer à son niveau plein, le sommet de la zone verte, et comme le stock redescend à peu près d'une zone verte entre deux commandes, chacune en reconstitue une (Ptak & Smith, 2016). Sa hauteur fixe donc la taille des commandes, et avec elle leur fréquence : une grande zone verte donne de grosses commandes espacées, une petite des commandes modestes et rapprochées (Ptak & Smith, 2016). Pour la dimensionner, on prend une fraction de la zone jaune, donnée par le facteur de délai (lead time factor, LTF), un pourcentage que la méthode fixe selon la longueur du délai découplé (Ptak & Smith, 2016). Plus le délai découplé est long, plus ce pourcentage est petit (Ptak & Smith, 2016).

La raison tient au calcul lui-même : la zone verte étant une fraction de la zone jaune, et la zone jaune grandissant déjà avec le délai découplé, garder la même fraction donnerait une zone verte énorme dès que la zone jaune l'est (Ptak & Smith, 2016). On réduit donc la fraction à mesure que la zone jaune grandit, pour que le buffer ne gonfle pas deux fois pour une seule et même cause (Ptak & Smith, 2016).

Deux contraintes du terrain peuvent forcer à commander plus : le fournisseur qui ne livre pas en dessous d'un minimum (*minimum order quantity, MOQ*), ou un rythme de livraison fixe, comme un camion par semaine, où chaque commande doit alors couvrir toute la semaine (Silver et al., 1998 ; Miclo et al., 2019). On garde alors la plus grande valeur entre la taille calculée et ce qu'imposent ces contraintes pour déterminer cette zone verte (Miclo et al., 2019).

3.2.3 La zone rouge

Les zones jaune et verte décrivent le fonctionnement normal : elles se calculent à partir de la consommation moyenne et du délai découplé attendu (Ptak & Smith, 2016). Or la réalité s'en écarte de temps en temps, le temps d'un pic de demande ou d'une livraison en retard, et c'est ce que la zone rouge vient couvrir, une réserve de sécurité placée sous le stock courant pour absorber ces écarts (Miclo et al., 2019). **La zone rouge additionne deux quantités, la base rouge et la sécurité rouge** (Ptak & Smith, 2016). La base rouge est la zone jaune multipliée par le facteur de délai (*lead time factor, LTF*), soit le même calcul que la zone verte tant qu'aucune quantité minimale ni rythme de livraison fixe ne l'a fait grossir (Ptak & Smith, 2016). La sécurité rouge s'obtient en multipliant la base rouge par le facteur de variabilité (*variability factor, VF*) (Ptak & Smith, 2016). Ce second facteur est un pourcentage fixé selon l'irrégularité observée de l'article : plus sa demande et son délai d'approvisionnement varient, plus il est élevé (Ptak & Smith, 2016). Entrer dans cette zone n'est donc pas anodin : l'article a épuisé sa couverture normale et puise dans sa réserve de sécurité, signe qu'une rupture se rapproche (Ptak & Smith, 2016).

Enfin, ces zones ne sont pas fixées une fois pour toutes, parce que la demande d'un article monte ou baisse avec le temps (Ptak & Smith, 2016). Alors à intervalle régulier, on reprend sa consommation moyenne des dernières semaines (*l'ADU*) et on recalcule les zones : elles grossissent si la demande a grimpé, elles rétrécissent si elle a baissé (Ptak & Smith, 2016). Le buffer colle ainsi à la tendance de fond, sans s'affoler pour une seule journée plus chargée que les autres (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019).

3.3 Pilotage au quotidien

Une fois les buffers placés, dimensionnés et tenus à jour, il reste à faire tourner la méthode au quotidien. Chaque jour, pour chaque article porteur d'un buffer, le DDMRP doit décider s'il

déclenche une commande de réapprovisionnement et, si oui, de quelle taille (Ptak & Smith, 2016). Il y répond avec une règle unique, la même pour tous les articles et sans aucune prévision ; c'est cette règle que présente la suite (Ptak & Smith, 2016).

3.3.1 Calcul du flux disponible (NFP)

Pour décider s'il faut commander, il faut d'abord une image de la situation de l'article, et le stock présent en entrepôt n'en donne qu'une vue trompeuse : il ignore ce qui arrive déjà et ce que l'article doit déjà servir (Ptak & Smith, 2016). **Le flux disponible** (*net flow position, NFP*), dont la Figure 6 donne le calcul, corrige ces deux angles morts en ajustant le stock physique dans les deux sens (Ptak & Smith, 2016). On y ajoute les réapprovisionnements déjà commandés mais pas encore reçus, pour ne pas recommander ce qui est déjà en route ; on en retire la demande qualifiée, tout ce que l'article doit déjà servir, pour ne pas se croire couvert avec un stock en réalité déjà pris (Ptak & Smith, 2016). Le résultat donne la couverture réelle de l'article à l'instant présent (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019).

Ce que recouvre la demande qualifiée dépend du type de buffer (Ptak & Smith, 2016). **Pour un buffer de produit fini**, c'est la somme de trois choses : les commandes clients à servir depuis le stock aujourd'hui, les commandes clients qui auraient dû l'être avant et ne l'ont pas été, et les pics, c'est-à-dire les grosses commandes clients futures déjà connues, expliqués juste après (chapitre 3.3.2) (Ptak & Smith, 2016 ; Kortabarria et al., 2018). **Pour un buffer de composant**, c'est la somme de deux choses seulement : les quantités que la fabrication des articles utilisant ce composant doit prélever dans le buffer aujourd'hui, et les quantités que cette fabrication aurait dû y prélever les jours précédents sans avoir pu le faire (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Il n'y a pas de pics pour un composant, puisqu'il ne reçoit aucune commande client (Ptak & Smith, 2016).

3.3.2 Order Spike

Un pic de commande (order spike) ne concerne donc que les buffers de produits finis. C'est une grosse commande client dont la date de livraison est encore à venir, qui n'entre pas en théorie dans la demande qualifiée du jour et n'apparaîtrait qu'à sa date de livraison, trop tard pour être préparée (Ptak & Smith, 2016). C'est le seul cas où le DDMRP regarde vers l'avenir : chaque jour, il examine les commandes fermes déjà connues dont la livraison est prévue dans les jours qui viennent, sur un horizon égal au délai découplé de ce produit fini (Ptak & Smith, 2016). Cet horizon est exactement le temps qu'il faut au buffer pour se reconstituer, donc le délai à partir duquel il est encore possible d'agir : une commande plus lointaine n'est pas urgente, un horizon plus court serait trop tard (Ptak & Smith, 2016). Si l'une d'elles dépasse à elle seule un seuil, fixé en général à la moitié de la zone rouge, elle est repérée comme un pic (Ptak & Smith, 2016). On

l'ajoute alors à la demande qualifiée du jour, sans attendre sa date (Kortabarria et al., 2018). Le flux disponible chute alors ce qui déclenche une commande de réapprovisionnement, et le stock arrive à temps pour servir cette grosse commande (Kortabarria et al., 2018).

3.3.3 Seuils d'alerte et génération des commandes

Le flux disponible se compare alors aux trois zones empilées du buffer, et c'est de cette comparaison que sort la décision de commander ou non (Ptak & Smith, 2016). Tant que le flux disponible reste dans le vert, l'article est bien couvert et il n'y a rien à faire (Ptak & Smith, 2016). Dès qu'il descend dans le jaune, on commande de quoi le ramener au sommet de la zone verte, soit la différence entre ce sommet et le flux disponible du moment (Ptak & Smith, 2016). Le temps que la commande arrive, la consommation continue, et c'est exactement ce que la zone jaune a été taillée pour couvrir (Ptak & Smith, 2016). Et si la livraison tarde plus que prévu, au point que le flux disponible descend sous la zone jaune, la zone rouge est là précisément pour absorber ce retard (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). La Figure 6 récapitule cet enchaînement (Ptak & Smith, 2016).



Figure 6 : Le pilotage quotidien d'un buffer : calcul du flux disponible et comparaison aux trois zones pour décider s'il faut commander (adapté de Ptak & Smith, 2016).

3.3.4 Hybridation avec le MRP

La méthode est presque complète ; il reste les articles sans buffer, de loin les plus nombreux dans la nomenclature (Kortabarria et al., 2018). Pour eux, le DDMRP reprend tout simplement la logique du MRP (Kortabarria et al., 2018). Quand un buffer déclenche une commande de réapprovisionnement, celle-ci se décompose en besoins pour ses composants, niveau par niveau, comme le ferait un calcul MRP, et chaque composant est commandé **au strict nécessaire**, sans regroupement, puisqu'il ne porte aucun stock stratégique (Ptak & Smith, 2016 ; Kortabarria et al., 2018). Cette cascade s'arrête net dès qu'elle rencontre un composant protégé par un buffer : le besoin ne traverse pas ce buffer, mais s'ajoute à la demande qualifiée du buffer, qui déclenchera lui-même son réapprovisionnement le moment venu (Ptak & Smith, 2016 ; Kortabarria et al., 2018).

3.4 Conditions de performances

Trois situations rendent le DDMRP particulièrement pertinent (Miclo et al., 2019).

La première est une demande difficile à prévoir, et cela de deux façons : **soit elle est volatile, très irrégulière d'un jour à l'autre et est touchée par des pics, soit sa moyenne elle-même augmente ou diminue au fil du temps, comme lors d'une saison** (Miclo et al., 2019 ; Silver et al., 1998). Dans les deux cas, le MRP est en difficulté, parce qu'il fonctionne sur des prévisions : elles tombent à côté quand la demande est volatile, et elles suivent avec du retard quand la moyenne se met à monter ou à descendre à moins de recourir à un lissage exponentiel saisonnier mais cela suppose un historique de ventes assez conséquent (Christopher & Peck, 2004 ; Silver et al., 1998). Le DDMRP gère les deux de la même façon : ses buffers encaissent les à-coups au jour le jour, et comme ils sont recalculés régulièrement, ils grossissent ou rétrécissent quand la demande moyenne augmente ou diminue (Ptak & Smith, 2016). Plus la demande est irrégulière ou change de niveau, plus le DDMRP prend l'avantage (Miclo et al., 2019).

La deuxième situation concerne les **délais d'obtention longs, variables, ou les deux à la fois**, qu'ils viennent de l'achat ou de la fabrication (Miclo et al., 2019). Dans un buffer, le délai découplé ne sert pas seulement à dater les commandes : il entre dans le calcul de la zone jaune, donc dans la taille de la protection elle-même (Ptak & Smith, 2016). Un délai plus long élargit ainsi le buffer par le seul jeu de la formule, alors que le MRP doit décider d'autant plus tôt, sur une prévision d'autant moins fiable (Ptak & Smith, 2016 ; Vollmann et al., 2005). Quand un délai d'obtention varie, c'est la zone rouge qui prend le relais : elle est dimensionnée pour continuer à servir le temps qu'une livraison en retard arrive, et ce retard s'arrête au buffer sans se transmettre aux niveaux qui en dépendent (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Son épaisseur dépend toutefois pour rappel du facteur de variabilité, un coefficient que l'entreprise fixe sur un article bufferisé et révisé elle-même si les délais deviennent moins réguliers (Ptak & Smith, 2016).

La troisième est **le partage d'un même composant entre de nombreux produits finis** (Chopra & Meindl, 2015). Plutôt que de stocker tous les produits finis possibles, ce qui coûte cher et prend de la place, on place un buffer sur ce composant commun et on n'assemble le produit qu'une fois la commande du client connue (Ptak & Smith, 2016). On tient ainsi moins de stock au total sans rien perdre en réactivité : c'est la **différenciation retardée** (Chopra & Meindl, 2015). Elle est précieuse dans l'automobile ou l'électronique, où le client veut un produit personnalisé mais livré très vite (Chopra & Meindl, 2015).

On voit donc que le DDMRP maintient un taux de service élevé dans des environnements où les conditions de performance du MRP ne sont pas réunies, un environnement plus incertain (Miclo et al., 2019).

3.5 Limites

Ces atouts ont leur contrepartie : le DDMRP présente aussi trois limites principales (Miclo et al., 2019).

La première tient à **son coût de possession**, plus élevé que celui du MRP puisque le DDMRP maintient en permanence du stock dans ses buffers (Miclo et al., 2019). Ce surcoût est le prix de la protection, et il se justifie tant qu'il y a de la variabilité à absorber (Miclo et al., 2019). Mais quand **la demande et les délais sont stables et prévisibles**, il n'y a presque rien à absorber, et ce stock permanent devient une dépense sans contrepartie (Miclo et al., 2019). Le MRP, qui planifie au plus juste sans maintenir ce stock, reprend alors l'avantage (Miclo et al., 2019).

La deuxième tient à **son temps de réaction quand la demande décroche (Miclo et al., 2019)**. Les zones ne sont pas recalculées en continu, mais à intervalle régulier, d'une semaine à un mois selon les entreprises : si la demande chute durablement, les buffers, encore calés sur la consommation d'avant, restent gonflés jusqu'au recalcul suivant (Ptak & Smith, 2016). Pendant ces quelques semaines, l'entreprise porte un stock qui ne correspond plus à la demande, et paie pour le garder (Silver et al., 1998).

La troisième tient au **mécanisme d'Order Spike, utile mais imparfait**, qui laisse passer deux cas (Ptak & Smith, 2016). D'abord, une grosse commande juste sous le seuil de détection, un seuil réglé à la main, en général à la moitié de la zone rouge : elle n'est pas repérée, et aucun réapprovisionnement anticipé ne part (Ptak & Smith, 2016). Ensuite, une commande annoncée trop loin, au-delà de l'horizon que le système surveille : elle reste invisible tant qu'elle n'entre pas dans cette fenêtre, et n'est donc préparée qu'à partir de ce moment (Ptak & Smith, 2016). Le système reste donc sujet à des ruptures.

4. Conclusion des 2 méthodes

Au terme de cette partie, deux philosophies opposées se dégagent. Le MRP planifie tout à l'avance à partir de prévisions et fait descendre ce plan dans la nomenclature : précis et économe en stock quand tout est stable, mais fragile dès que la demande ou les délais s'écartent du prévu (Orlicky, 1975 ; Lee et al., 1997). Le DDMRP fait l'inverse, en découplant la chaîne par des buffers qui réagissent à la consommation réelle : robuste face à la variabilité, mais au prix d'un stock plus élevé (Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019).

Aucune ne l'emporte donc dans l'absolu, et tout dépend de l'environnement (Miclo et al., 2019). Le DDMRP prend l'avantage là où l'incertitude domine : demande volatile ou saisonnière, délais d'obtention longs ou variables, composants communs que l'on personnalise au dernier moment

(Ptak & Smith, 2016 ; Miclo et al., 2019). Son coût de possession reste toutefois plus élevé, puisqu'il maintient du stock en permanence, et ce surcoût perd sa contrepartie dès que l'environnement se stabilise (Miclo et al., 2019). Deux faiblesses lui restent même en terrain favorable : un recalcul des 3 zones seulement périodique, qui prend un temps de retard face à un décrochage soudain de la demande, et une détection des pics qui laisse passer les commandes trop petites pour son seuil ou trop lointaines pour son horizon (Ptak & Smith, 2016).

Ces tendances restent qualitatives : la théorie donne un sens, pas une ampleur ni un point de bascule. Le tableau ci-dessous les résume facteur par facteur, tels que la partie pratique va les éprouver, de la variabilité de la demande à la saisonnalité (Miclo et al., 2019).

Facteur d'environnement	Effet attendu sur le MRP	Réponse attendue du DDMRP
Demande stable et prévisible	Prévision fiable : bon service à faible stock	Buffers en partie inutiles : surcoût de stock
Forte variabilité de la demande	Prévision prise en défaut : le service baisse	Les buffers absorbent le bruit : service maintenu
Pics de commande fréquents	Pics mal absorbés : ruptures et coûts de rupture	Détection des pics et réapprovisionnement anticipé : service maintenu
Délai d'obtention long	Exposition accrue aux ruptures	Le buffer couvre l'attente : service protégé, stock plus élevé
Demande saisonnière	Prévision par moyenne mobile en retard sur la vague : service se dégrade. Une prévision saisonnière peut cependant réaméliorer le service	Le recalcul suit la tendance : service maintenu

Tableau 1 : Ce que la théorie laisse attendre de chaque méthode selon l'environnement, mis à l'épreuve dans la partie pratique.

Partie pratique

La partie pratique présente l'expérimentation réalisée ainsi que les résultats de celle-ci.

5. Démarche expérimentale

5.1 De la théorie à l'expérimentation

Le Tableau 1 indique dans quel sens chaque méthode devrait réagir, sans dire de combien ni à partir de quel niveau de dégradation. Répondre à cette question demande de comparer les deux méthodes toutes choses égales par ailleurs, ce qu'une étude en entreprise ne permet pas : une entreprise n'applique qu'une méthode à la fois, et deux périodes successives ne connaissent jamais la même demande. La simulation lève cet obstacle, puisqu'elle autorise à rejouer une situation identique en ne changeant qu'un élément, et à observer l'effet de ce seul changement (Law & Kelton, 2000). Ce chapitre 5 décrit le dispositif retenu, puis pose les questions de recherche qui structureront la comparaison.

5.2 Le dispositif : ce que nous allons faire

5.2.1 Une chaîne logistique virtuelle

Le recours à la simulation étant justifié, reste à décrire le dispositif lui-même. Une petite chaîne logistique est reconstruite dans un programme informatique, avec ses articles, ses délais, ses coûts et ses règles de fonctionnement. On la fait ensuite vivre jour par jour pendant 60 semaines : chaque jour, des clients passent commande, les stocks baissent, la méthode de planification décide quoi commander, et les livraisons arrivent après leur délai. La comparaison ne tient pas en une seule simulation : plusieurs expériences sont menées sur cette même chaîne, rejouée telle quelle sous des scénarios qui dégradent, un aspect à la fois puis tous, l'environnement dans lequel elle fonctionne. Le plan de ces expériences est donné au chapitre 6.5.

5.2.2 Une même demande pour les deux méthodes

Il reste à donner une demande à cette chaîne. La demande de chaque journée est produite par **tirage pseudo-aléatoire** : on fournit à l'algorithme une moyenne et un écart-type, qui décrivent le profil de demande du produit, ainsi qu'une valeur de départ appelée graine. L'algorithme fabrique alors une suite de nombres qui se comportent comme du hasard autour de cette moyenne, et la même graine redonne toujours la même suite, donc la même demande (Law & Kelton, 2000). La demande est générée une seule fois, jour par jour, puis enregistrée ; cette même série de demande est ensuite donnée au MRP, puis au DDMRP. Les deux méthodes affrontent donc exactement les mêmes clients aux mêmes dates, et plus largement tout ce qui n'est pas une décision de planification est identique des deux côtés : mêmes délais, mêmes coûts, même contrainte physique, un ordre de fabrication ne pouvant être lancé que si ses composants sont disponibles en stock. Tout écart de performance ne peut donc venir que de la logique de décision (Law & Kelton, 2000).

5.2.3 Vingt répliques et huit semaines de rodage

Une seule série de demande pourrait toutefois, par hasard, favoriser une méthode. Chaque scénario est donc rejoué 20 fois, avec 20 séries de demande différentes : ce sont les répliques (Law & Kelton, 2000). Les résultats présentés sont les moyennes de ces vingt répliques (Law & Kelton, 2000). Ce sont bien les résultats qui sont moyennés, jamais les demandes : une moyenne de vingt demandes aléatoires donnerait une courbe lissée, presque constante, et ferait disparaître la variabilité que l'étude cherche précisément à tester (Law & Kelton, 2000).

Par ailleurs, les 8 premières semaines de chaque réplique sont exclues des mesures : elles servent de rodage, le temps que les deux systèmes atteignent leur régime de croisière (Law & Kelton, 2000). Cette durée, conservée dans toutes les expériences, vaut deux fois le délai le plus

long du scénario de référence, de quoi laisser les stocks et les moyennes se stabiliser avant de mesurer (Law & Kelton, 2000).

5.2.4 Les règles de mesure

Deux règles de mesure complètent le dispositif. D'abord, une unité n'est comptée comme servie que si elle est livrée le jour même de la commande, sans aucun délai de grâce : les deux produits finis sont fabriqués sur stock, avec une **tolérance client proche de zéro**, le critère même qui justifiait de leur poser un buffer (voir 3.1.1). **Le transport jusqu'au client n'est pas modélisé** : une unité de produit fini est considérée comme servie dès qu'elle quitte le stock à la date voulue. Cette simplification ne fausse pas la comparaison, puisque ce délai serait le même pour les deux méthodes et ne dépend d'aucune décision de planification. Quand le stock ne suffit pas, le client n'annule pas sa commande : les unités manquantes partent en reliquat et sont livrées dès qu'une réception arrive, en priorité sur la demande du jour ; **c'est l'hypothèse dite de ventes différées**, la plus courante dans les relations industrielles (Silver et al., 1998). Ces unités livrées en retard restent comptées comme non servies à temps, avec le coût de rupture correspondant (Silver et al., 1998). Les reliquats ne sont pas oubliés par la méthode qui les a créés : la semaine suivante, le MRP les ajoute au besoin qu'il recalcule ; chaque jour, le DDMRP les compte dans la demande qualifiée, ce qui abaisse d'autant le flux disponible du buffer (voir 3.3.1).

Ensuite, **le stock est relevé chaque jour, et c'est la moyenne de ces relevés qui est retenue**. Le niveau de stock varie en effet beaucoup à l'intérieur d'une même semaine : il est au plus haut le jour d'une réception, au plus bas juste avant la suivante (Silver et al., 1998). Ne le relever qu'une fois par semaine donnerait donc un chiffre qui dépend entièrement du jour choisi, alors que la moyenne journalière mesure le stock réellement immobilisé sur toute la période (Law & Kelton, 2000).

La performance sera jugée sur **trois indicateurs**, calculés de façon identique pour les deux méthodes : le taux de service, le stock moyen et le coût total. Le dispositif étant posé, reste à préciser les questions auxquelles il doit répondre.

5.3 Questions de recherche et démarche

Deux questions structurent la comparaison ; elles reprennent les deux termes de la question centrale posée en introduction. La première porte sur la **performance** : comment le taux de service, le stock et le coût total de chaque méthode évoluent-ils selon l'environnement ?

La seconde porte sur la **résilience** : laquelle maintient le mieux ces trois indicateurs, sans qu'aucun paramètre soit retouché, lorsque la demande devient plus variable, lorsque les commandes

exceptionnelles se multiplient, lorsque le délai critique s’allonge ou lorsqu’on introduit de la saisonnalité dans la demande ?

6. La simulation : une chaîne logistique, deux pilotes

Le chapitre 5 a décrit la mécanique du dispositif ; ce chapitre 6 en fixe le contenu concret : le scénario de référence, le paramétrage de chaque méthode, les indicateurs, le plan des expériences qui vont être réalisées et une vue d’ensemble du code informatique.

6.1 Le scénario de référence

La chaîne, les délais, les coûts et la demande décrits dans cette section 6.1 forment ce que le mémoire appelle le scénario de référence : le point de départ commun aux deux méthodes, dont les expériences du chapitre 7 modifieront un seul aspect à la fois, puis tous. Le terrain d’expérimentation est **une chaîne logistique de six articles** : deux produits finis (PF1, PF2), un sous-ensemble (SA) et trois composants achetés (C1, C2, C3). Cette taille est un compromis : assez riche pour que les mécanismes des deux méthodes s’expriment, assez réduite pour que chaque résultat reste explicable. Les études qui évaluent le DDMRP par simulation font le même choix de nomenclatures réduites (Miclo et al., 2019).

La Figure 7 montre la structure. Les deux produits finis sont volontairement opposés : PF1 fait face à une demande régulière, PF2 à une demande volatile ponctuée de grosses commandes. La partie théorique a montré que le choix entre les deux méthodes dépend justement de la stabilité de la demande (voir 2.4 et 3.4) ; la chaîne contient donc les deux situations à la fois, comme la plupart des portefeuilles industriels réels (Chopra & Meindl, 2015). Les deux produits partagent le sous-ensemble SA : un composant commun reçoit la somme des consommations des deux produits, dont les écarts se compensent partiellement, ce qui en fait un candidat naturel au découplage (voir 3.1.3) (Silver et al., 1998 ; Ptak & Smith, 2016). SA consomme 2 unités de C1, acheté avec 4 semaines de délai : tout en bas de la nomenclature et avec le délai le plus long de la chaîne, C1 est l’article critique, car aucun produit fini ne peut sortir s’il manque. C2 et C3, plus courts, complètent chacun un produit fini.

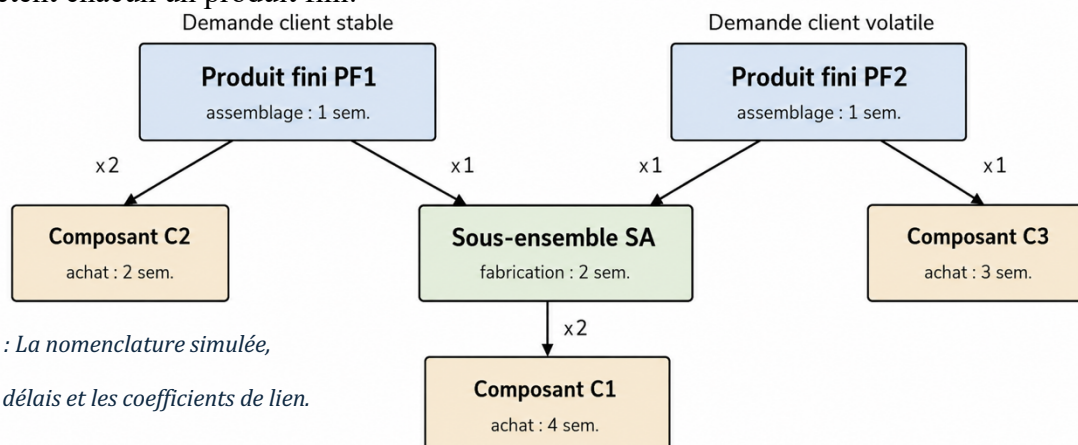


Figure 7 : La nomenclature simulée,
avec les délais et les coefficients de lien.

Les délais d'obtention s'allongent volontairement à mesure qu'on descend dans la nomenclature : du composant C1 au produit fini, le délai cumulé atteint environ 7 semaines, face à des clients qui ne tolèrent aucune attente. C'est exactement le décalage qui rend la planification difficile, et que les deux méthodes prétendent résoudre. Une hypothèse complète cet environnement. **Les délais sont fixes et parfaitement fiables** dans le scénario de référence : une commande arrive toujours exactement après son délai annoncé, pour exactement la quantité commandée. Ce point de départ stable est volontaire, car il permettra ensuite de faire varier un seul délai à la fois, par exemple celui de C1, et d'isoler l'effet de ce seul changement (voir chapitre 6.5). La seule incertitude du scénario de référence reste donc la demande des clients, et toute rupture observée ici ne peut venir que d'une demande mal absorbée.

Le fournisseur de C1 impose deux contraintes, courantes pour les composants achetés en grand volume : une quantité minimale de 400 unités par commande (MOQ) et une seule commande par semaine (Silver et al., 1998). Elles s'appliquent aux deux méthodes.

Chaque article porte trois types de coûts, résumés au même Tableau 2. Les coûts de possession et de passation ont été définis au chapitre 2.3 de la partie théorique. Le coût de rupture, propre aux produits finis, est la perte subie pour chaque unité non servie à temps : pénalité contractuelle, vente perdue, image dégradée (Silver et al., 1998 ; Vollmann et al., 2005). Les proportions de ces coûts suivent la logique industrielle (Silver et al., 1998). **La possession coûte plus cher sur un produit fini que sur un composant** : elle suit la valeur de l'article, et un produit assemblé vaut plus que les matières qui le composent (Silver et al., 1998 ; Chopra & Meindl, 2015). **La passation coûte plus cher sur les composants achetés que sur les produits finis**, car ces composants s'achètent en grand volume auprès d'un fournisseur (Silver et al., 1998). **La rupture ne frappe que les produits finis, seuls articles exposés aux clients**. Les montants ne proviennent pas d'une entreprise réelle et leur niveau absolu importe peu : ce qui compte, ce sont les rapports entre eux, puisque ce sont eux qui rendent les résultats interprétables. Ces rapports suivent les recommandations de la littérature, et les mêmes tarifs sont appliqués aux deux méthodes (Silver et al., 1998 ; Chopra & Meindl, 2015).

Article	Rôle	Délai	Possession (u/sem.)	Passation (par commande)	Rupture (par unité)
PF1	produit fini, demande stable	1 sem.	1,00	50	25
PF2	produit fini, demande volatile	1 sem.	1,00	50	25
SA	sous-ensemble partagé	2 sem.	0,50	75	/
C1	composant acheté	4 sem.	0,20	100	/

Article	Rôle	Délai	Possession (u/sem.)	Passation (par commande)	Rupture (par unité)
C2	composant acheté	2 sem.	0,10	80	/
C3	composant acheté	3 sem.	0,15	80	/

Tableau 2 : Paramètres de la chaîne simulée dans le scénario de référence. Le coût de rupture ne s'applique qu'aux produits finis, seuls articles exposés à la demande des clients.

Reste la demande des produits finis, générée jour par jour **en combinant deux ingrédients**, dont le Tableau 3 donne les paramètres. Le premier est une consommation de base, tirée chaque jour dans une loi normale, définie par sa moyenne et son écart-type : autour de sa moyenne, PF1 varie peu, PF2 beaucoup; un tirage négatif est ramené à zéro.

Le second est l'arrivée occasionnelle de grosses commandes fermes, dont la quantité est tirée entre 30 et 70 unités, soit plusieurs jours de consommation, annoncées par le client 2 semaines avant leur date de livraison. Ces valeurs sont des choix de calibrage : une commande exceptionnelle pèse assez pour perturber le plan sans être un cas extrême, et sa fréquence sépare nettement les deux produits, avec une probabilité quotidienne de 2 % pour PF1, soit une commande exceptionnelle toutes les 10 semaines environ, contre 6 % pour PF2, soit une toutes les 3 semaines. Ce préavis de 2 semaines est choisi exprès. Il laisse le temps d'assembler le produit fini, dont le délai est d'une semaine, mais pas de commander le composant C1, qui demande 4 semaines : quand la commande est annoncée, C1 doit donc déjà être en stock. C'est exactement sur ce point que les protections des deux méthodes seront mises à l'épreuve. Ce mélange, un fond régulier ponctué de commandes exceptionnelles, reproduit une situation industrielle courante (Ptak & Smith, 2016).

Paramètre	PF1	PF2
Profil de demande	régulière	volatile
Demande moyenne (unités/jour ouvré)	20	12
Écart-type de la demande journalière	3 unités (15 % de la moyenne)	4,8 unités (40 % de la moyenne)
Proba. d'une commande exceptionnelle (par jour)	2 %	6 %
Taille d'une commande exceptionnelle	30 à 70 unités	30 à 70 unités
Préavis d'annonce pour les commandes except.	2 semaines	2 semaines

Tableau 3 : Paramètres de la demande des deux produits finis dans le **scénario de référence**.

Imaginons maintenant une entreprise plongée dans cet environnement. Face à cette demande et à ces délais, elle doit décider quoi commander, quand et en quelle quantité, en protégeant son service client sans stocker à l'excès. Les deux sections suivantes montrent comment chaque méthode s'y prend dans ce scénario de référence : le paramétrage du MRP d'abord, celui du DDMRP ensuite.

6.2 Le paramétrage du MRP

Première méthode à paramétrer : le MRP. Il applique la mécanique du chapitre 2.2 avec un cycle hebdomadaire (Orlicky, 1975). Le seul élément à paramétrer est la prévision. La demande attendue est ici la moyenne des 4 dernières semaines de ventes réelles, et la valeur retenue pour une semaine est la plus élevée entre cette prévision et les commandes fermes déjà connues, comme le veut le programme directeur en production sur stock (voir chapitre 2.2) (Vollmann et al., 2005).

Les protections sont placées là où est l'incertitude. Les deux produits finis portent chacun un stock de sécurité, proportionné à l'incertitude de leur demande (Silver et al., 1998 ; Vollmann et al., 2005). Celui de PF2, le produit volatil, est donc plus grand. Les composants n'en portent aucun. La raison est simple : dans cette simulation, leurs délais sont déterministes, comme posé au chapitre 6.1, ils arrivent toujours à l'heure et dans la quantité commandée. L'incertitude de demande est ainsi couverte au niveau des produits finis (Vollmann et al., 2005).

Chaque article commande ensuite selon une politique de lotissement. Les trois politiques utilisées ont été présentées au chapitre 2.3 de la partie théorique, et le choix par article suit l'arbitrage entre coût de passation et coût de possession (Silver et al., 1998). Les produits finis sont les articles les plus chers à stocker. Ils commandent donc en lot-pour-lot, exactement le besoin de la semaine, sans surplus (voir chapitre 2.3.1) (Vollmann et al., 2005). Les articles intermédiaires SA, C2 et C3 coûtent peu à stocker mais cher à commander. Ils suivent donc la period order quantity, qui regroupe plusieurs semaines de besoins dans une même commande (voir chapitre 2.3.2). L'intervalle de chaque article vient de sa quantité économique, convertie en durée puis arrondie à la semaine entière (APICS, 2023). Le composant C1 pousse cet arbitrage à l'extrême, avec le coût de commande le plus élevé de la chaîne et le coût de possession le plus faible. Il commande donc en gros lots de taille fixe, calculés avec la formule de la quantité économique présentée au chapitre 2.3.3 (Silver et al., 1998). Ce calcul donne un lot d'environ 600 unités, largement au-dessus de la quantité minimale de 400 unités imposée par le fournisseur (voir chapitre 6.1) : cette contrainte ne joue donc aucun rôle pour le MRP. Les trois politiques classiques coexistent ainsi dans la simulation, chacune sur les articles où elle est la plus adaptée. Le MRP entre donc dans la comparaison configuré au mieux de ces règles. Le Tableau 4 résume ces réglages, et **le détail des calculs de ces réglages retenus, article par article, figure en Annexe 1.**

Article	Stock de sécurité	Politique de lotissement	Réglage retenu
PF1	40 unités (≈ 2 écarts-types hebdo., pics compris)	lot-pour-lot (L4L)	commande = besoin net de la semaine
PF2	90 unités (≈ 3 écarts-types hebdo., pics compris)	lot-pour-lot (L4L)	commande = besoin net de la semaine

Article	Stock de sécurité	Politique de lotissement	Réglage retenu
SA	aucun	period order quantity (POQ)	intervalle de : 1 semaine
C2	aucun	period order quantity (POQ)	intervalle de : 3 semaines
C3	aucun	period order quantity (POQ)	intervalle de : 4 semaines
C1	aucun	quantité économique (EOQ)	lot EOQ recalculé : 600 unités

Tableau 4 : Le paramétrage MRP du scénario de référence.

Le MRP est en place. La section suivante paramètre le DDMRP dans ce même environnement, avec les mêmes contraintes.

6.3 Le paramétrage du DDMRP

Le DDMRP applique, lui, la mécanique du chapitre 3 de la partie théorique. Trois choix restent à faire pour l'installer dans ce scénario de référence : **où placer les buffers**, **avec quels facteurs dimensionner leurs zones** sous réserve des contraintes du fournisseur de C1, et **comment régler la détection des pics de commande**.

Premier choix, l'emplacement : 3 articles portent un buffer, PF1, PF2 et C1, suivant les critères de positionnement du chapitre 3.1. Les buffers de PF1 et PF2 protègent le service aux clients, dont le temps de tolérance est proche de zéro pour des produits vendus sur stock dans notre scénario (voir théorie au chapitre 3.1.1). Celui de C1 neutralise le délai le plus long de la chaîne, 4 semaines (Ptak & Smith, 2016). Le sous-ensemble SA remplit pourtant le critère du composant commun (voir chapitre 3.1.3), mais il est déjà pris en étau entre les buffers de PF1 et PF2 en aval et celui de C1 en amont. Un buffer sur SA serait donc redondant : du stock immobilisé en permanence pour un gain marginal, alors que la méthode retient un nombre minimal de points de découplage (Ptak & Smith, 2016). SA, C2 et C3 ne portent ainsi aucun stock propre. Ils sont commandés en lot-pour-lot, pour la quantité exacte réclamée, au moment où un ordre les appelle, selon la logique d'hybridation du chapitre 3.3.4 (Kortabarria et al., 2018). Les politiques de lotissement du MRP ne s'appliquent donc pas à eux.

Deuxième choix, le dimensionnement. Chaque buffer est dimensionné par ses 3 zones, selon les règles du chapitre 3.2, **à partir de deux grandeurs**. La première est la consommation moyenne journalière (ADU), recalculée chaque semaine sur les 4 dernières semaines observées ; les zones sont ainsi redimensionnées 1 fois par semaine. Cette fenêtre est exactement celle de la prévision du MRP : les deux méthodes disposent de la même mémoire du passé, aucune n'entre mieux informée dans la comparaison. La seconde est le délai découplé de chaque buffer, calculé selon la règle du chapitre 3.1, illustrée pour rappel à la Figure 4 : on additionne les délais en remontant la nomenclature, et on s'arrête dès qu'on rencontre un article protégé par un buffer. Pour PF1, 1 semaine d'assemblage plus les 2 semaines de SA donnent 3 semaines, la remontée

s'arrêtant au buffer de C1. Pour PF2, la branche la plus longue passe par C3 : 1 semaine plus 3 donnent 4 semaines. Pour C1, acheté sans composant, le délai découplé est simplement son délai d'achat, 4 semaines. Le Tableau 5 récapitule ces délais découplés.

Ces zones dépendent enfin de deux facteurs, choisis selon les règles posées au chapitre 3.2, et que le Tableau 5 résume. **Le facteur de délai (LTF)** se prend d'autant plus bas que la zone jaune à fractionner est grande (voir chapitre 3.2.2) : PF1 reçoit 0,5, PF2 0,4, et C1 0,3, sa consommation journalière étant près de cinq fois celle de PF2. **Le facteur de variabilité (VF)** se prend d'autant plus haut que la demande est volatile (voir chapitre 3.2.3) : 0,4 pour PF1, le produit stable, 0,7 pour PF2, le produit volatil, et 0,5 pour C1, qui reçoit la somme des deux flux, dont les à-coups se compensent en partie.

Deux contraintes du fournisseur de C1, posées au chapitre 6.1, s'ajoutent enfin à ces facteurs : un minimum de 400 unités par commande et une seule commande par semaine. La zone verte de C1 retient donc la plus grande valeur entre le calcul par le facteur de délai et ce qu'imposent ces deux contraintes (voir chapitre 3.2.2).

Buffer	Délai découplé	Facteur de délai (LTF)	Facteur de variabilité (VF)	Contraintes de commande
PF1	3 semaines	0,5	0,4 (demande stable)	aucune
PF2	4 semaines	0,4	0,7 (demande volatile)	aucune
C1	4 semaines	0,3	0,5 (flux mutualisé)	MOQ de 400 unités, 1 commande par sem.

Tableau 5 : Le paramétrage DDMRP du scénario de référence. Le calcul complet des zones figure en Annexe 2.

Reste la détection des pics de commande (voir chapitre 3.3.2). Le seuil recommandé, la moitié de la zone rouge, vaudrait 102 unités pour PF2 : aucune commande exceptionnelle simulée, de 30 à 70 unités, ne serait jamais détectée. Il est donc abaissé à 30 % de la zone rouge, soit 61 unités. À 61 unités, seules les commandes qui approchent le haut de la fourchette sont anticipées, les autres restant dans ce que le buffer absorbe seul (Ptak & Smith, 2016). L'horizon de surveillance reste le délai découplé du produit fini (chapitre 3.3.2), mais une commande n'y est visible qu'à son annonce, 2 semaines avant livraison (Tableau 3) ; elle entre alors dans la demande qualifiée et le flux disponible chute aussitôt.

Les deux méthodes sont désormais réglées, dans le même environnement et avec les mêmes contraintes. Le calcul complet des zones de chaque buffer figure en Annexe 2.

6.4 Les indicateurs qui arbitrent la comparaison

Trois indicateurs mesurent le résultat de chaque expérience. Tous se calculent de façon identique pour les deux méthodes.

Le taux de service divise les unités livrées à temps par les unités demandées : sur tout ce qu'un client réclame un jour donné, combien sort du stock le jour même (Silver et al., 1998) ? C'est l'indicateur de la satisfaction du client, calculé sur les deux produits finis réunis (Vollmann et al., 2005).

Le stock moyen est calculé en additionnant le stock relevé chaque jour, puis en divisant par le nombre de jours. On obtient ainsi le stock moyen journalier de chaque article, et le stock moyen total de la chaîne est la somme des stocks moyens de chaque article (Silver et al., 1998). C'est de l'argent immobilisé et de la place occupée. Il est le contrepoids du service, car bien servir devient facile dès qu'on accepte de stocker énormément (Silver et al., 1998).

Le coût total ramène ces deux forces opposées à une même mesure, l'argent, en additionnant **trois factures dont les tarifs figurent au Tableau 2** (Silver et al., 1998). **Le coût de possession total** se calcule semaine par semaine : pour chaque article, on prend son stock moyen sur les 5 jours de la semaine, on le multiplie par son coût de possession (en euros par unité et par semaine), et on additionne ces montants sur les 52 semaines mesurées. Une unité qui reste longtemps en stock est donc payée chaque semaine où elle y est (Silver et al., 1998). **Le coût de passation total** compte chaque commande lancée pour un montant fixe, qu'elle porte sur dix ou sur mille unités : on multiplie le nombre de commandes de chaque article par son tarif (APICS, 2023). **Le coût de rupture total** compte une seule fois chaque unité qu'un client réclame et qui n'est pas livrée le jour même, même si elle part quelques jours plus tard.

Ces trois indicateurs seront relevés de la même façon dans toutes les expériences ; la section suivante décrit lesquelles, et ce que chacune fait varier.

6.5 Le plan des expériences

Toutes les expériences partent du même point : l'environnement du scénario de référence, décrit au chapitre 6.1 et résumé par les Tableaux 2 et 3. **C'est sur cet environnement, et sur lui seul, que les deux méthodes ont été réglées au mieux des règles admises**, le MRP au chapitre 6.2 et le DDMRP au chapitre 6.3. Les expériences le dégradent ensuite, un aspect à la fois, **sans qu'aucun réglage soit retouché** : la question posée est celle que rencontre une entreprise, dont les paramètres ont été fixés sur un environnement donné et dont cet environnement change. Ce gel des réglages reproduit la réalité des entreprises, qui ne recalculent pas leurs paramètres à chaque évolution du

marché : c'est cette capacité à tenir sans retouche, la résilience, que les expériences mesurent (Christopher & Peck, 2004).

4 expériences, notées E1 à E4, partent toutes du scénario de référence et n'en modifient qu'un seul levier à la fois, parcouru en plusieurs niveaux du plus doux au plus sévère, tout le reste conservant les valeurs de ce scénario (Tableau 3). Chaque écart peut ainsi être attribué à une cause précise. E1 augmente la variabilité de la demande, mesurée par le coefficient de variation (CV), l'écart-type divisé par la moyenne (Silver et al., 1998) : la moyenne paramétrique ne change pas, seuls les écarts d'un jour à l'autre grandissent. **Pour cette E1, les commandes exceptionnelles y sont volontairement supprimées sur les 2 produits finis, afin d'isoler cette variabilité seule.** E2 fait varier la fréquence des commandes exceptionnelles du seul produit fini PF2. E3 allonge le délai du composant critique C1. E4 fait onduler la moyenne de la demande elle-même (saisonnalité) : au lieu de rester fixe, elle suit un cycle de 26 semaines composé de 13 semaines de saison haute puis de 13 semaines de saison basse, dont l'amplitude se règle en pourcentage de la moyenne journalière du scénario de référence (Tableau 3). Un dernier scénario, **E5**, cumule tout, variabilité forte, pics fréquents, délai long et saison : il n'isole aucune cause, mais éprouve les méthodes dans les pires conditions.

6.6 Explication du code

La chaîne, les deux méthodes, les indicateurs et le plan des expériences étant définis, il reste à décrire comment l'ensemble est mis en œuvre. Le programme informatique repose sur 4 fonctions principales et une double boucle. Les couleurs relient chaque étape du schéma (Figure 8) au passage du texte correspondant.

Les données du scénario de référence sont déclarées en début de code. La variable **CHILDREN** contient la nomenclature (1 PF1 = 1 SA et 2 C2) ; **LT_J** est un dictionnaire des délais, où chaque article a sa clé ; **H**, **S** et **PI** les trois coûts ; la variable **DEMANDE** contient la moyenne et l'écart-type des demandes des produits finis ainsi que la fréquence des commandes exceptionnelles de ceux-ci.

La fonction **genere_demande** fabrique une demande de 60 semaines par tirages pseudo-aléatoires, chaque journée étant tirée à partir de la moyenne et de l'écart-type du produit. Elle reçoit en plus une **graine**, point de départ des tirages : la même graine redonne la même demande. Une autre graine, avec les mêmes moyenne et écart-type, en produit une différente. **Les vingt réplifications sont obtenues en appelant vingt fois cette fonction avec vingt graines différentes.** Chaque demande est rangée dans une variable, puis donnée aux deux fonctions **simule_mrp** et **simule_ddmrp** : c'est ainsi que les deux méthodes affrontent la même demande. Chacune les

déroule selon sa logique et renvoie l'enregistrement de ce qui s'est passé, que la fonction **calcule_kpis** résume en trois indicateurs.

Faire varier l'environnement ne demande pas de nouveau programme : il suffit de donner à la fonction **applique_scenario** la consigne du changement, sous la forme d'une étiquette et d'une valeur : **{"delai_c1" : 30}** signifie « délai de C1 : trente jours ». Une consigne peut réunir plusieurs changements, décrivant un scénario en une ligne. La fonction remet les variables à leur valeur de référence, puis traduit la consigne en écrivant 30 dans **LT_J["C1"]**, c'est-à-dire la valeur rangée sous la clé C1 du dictionnaire **LT_J**. Pour observer l'effet de ce délai, il suffit d'écrire la liste des valeurs à tester, **[10, 15, 20, 25, 30]** jours, et de les parcourir l'une après l'autre :

```
POUR chaque valeur de la liste [10, 15, 20, 25, 30] :
    applique_scenario({"delai_c1" : valeur}) # écrit la valeur dans LT_J["C1"]
    POUR chaque graine, de 1000 à 1019 : # 20 réplifications
        demande = genere_demande(graine) # 60 semaines de demande
        res_MRP = simule_mrp(demande) # la même demande...
        res_DDMRP = simule_ddmrp(demande) # ...donnée aux deux méthodes
        garder calcule_kpis(res_MRP) et calcule_kpis(res_DDMRP)
        # 3 indicateurs par méthode
    moyenne des indicateurs sur les 20 réplifications # le résultat publié
    restaure_parametres_reference() # avant la valeur suivante
```

Figure 8 : La double boucle du programme, une expérience à cinq niveaux jouée sur vingt réplifications ; les couleurs renvoient aux passages du texte qui décrivent chaque fonction.

La boucle intérieure rejoue vingt réplifications et garde les trois indicateurs de chaque méthode : **c'est sur eux que porte la moyenne**, qui devient un point des courbes. Le schéma ne montre qu'une expérience : le programme enchaîne de la même façon les autres listes de valeurs. C'est cette mécanique qui produit les résultats présentés au chapitre suivant.

Le programme est écrit en Python (Van Rossum & Drake, 2009) et n'utilise que deux bibliothèques externes : NumPy pour le calcul numérique (Harris et al., 2020) et Matplotlib pour les figures (Hunter, 2007). Il ne contient aucun algorithme nouveau. La cascade de calcul du MRP reprend celle d'Orlicky (1975) et de Vollmann et al. (2005), les politiques de lotissement celles de Silver et al. (1998), le dimensionnement des zones et le pilotage quotidien des buffers ceux de Ptak et Smith (2016). Le principe même de la comparaison, deux systèmes de planification confrontés à la même demande simulée et jugés sur le service, le stock et le coût, reprend celui de Miclo et al. (2019), et le protocole statistique, réplifications et période de chauffe comprises, suit Law et Kelton (2000).

Le code est disponible au lien GitHub suivant : [Git](#).

7. Résultats des expériences

Ce chapitre expose et discute les résultats, scénario après scénario ; la synthèse, la robustesse et les limites viennent ensuite, aux chapitres 8 à 10.

7.1 Le scénario de référence : les premiers résultats

Le Tableau 6 donne les résultats du scénario de référence. Le DDMRP sert nettement mieux les clients : 99,6 % de la demande servie à temps, contre 90,8 % pour le MRP, et presque tout l'écart vient du produit volatil PF2 (99,1 % contre 84,2 %). Deux mécanismes l'expliquent. D'abord, la prévision du MRP est la moyenne des quatre dernières semaines : quand la demande de PF2 s'emballe, elle monte plus lentement que la réalité, et la commande corrective part trop tard. Ensuite, le préavis de deux semaines des grosses commandes suffit pour assembler le produit fini, mais pas pour racheter le composant C1, qui demande quatre semaines : si le stock amont est trop bas ce jour-là, la rupture est inévitable. Le DDMRP évite ce piège sans rien prévoir : son buffer C1 contient en permanence quatre semaines de consommation.

Ce meilleur service a un prix. Le DDMRP immobilise 1 906 unités contre 1 013, presque le double ; son coût de possession est pourtant presque le triple, 44 911 contre 15 350. La différence vient de l'endroit où dort le stock. Stocker un produit fini coûte 1,00 par unité (Tableau 2) et par semaine ; un composant, de 0,10 à 0,20. Or le MRP garde surtout des composants bon marché (833 unités sur 1 013), tandis que le DDMRP stocke 603 produits finis, plus de trois fois plus, au tarif le plus élevé. Le MRP paie en revanche ses ruptures : 21 596, contre 963. Les coûts de passation, 14 539 contre 14 151, ne départagent rien. Au total, le MRP coûte 51 485 et le DDMRP 60 025, soit 17 % de plus ; mais ce total plus faible s'accompagne d'un service très inférieur : les deux montants ne se comparent pas à qualité égale. Ce premier résultat est un arbitrage entre stock permanent et service quasi certain ; la suite montre comment il bascule.

Indicateur	MRP	DDMRP
Taux de service global	90,8 %	99,6 %
dont PF2 (produit volatil)	84,2 %	99,1 %
Stock moyen (unités)	1 013	1 906
Coût de possession	15 350	44 911
Coût de rupture	21 596	963
Coût total	51 485	60 025

Tableau 6 : Résultats du scénario de référence, moyennes de vingt répliques. Le coût plus faible du MRP s'accompagne d'un service nettement inférieur.

Une objection vient naturellement à l'esprit : ce résultat ne tient-il pas simplement à une protection trop faible du MRP ? Il suffirait d'augmenter ses stocks de sécurité pour retrouver le service du DDMRP, à moindre coût. L'objection est sérieuse et elle a été testée. La Figure 9 garde le même environnement et ne fait varier qu'un seul réglage : les stocks de sécurité des produits finis, multipliés progressivement de $\times 1$ (les 40 et 90 unités calibrées au départ) à $\times 4$; le DDMRP, lui, garde ses réglages de référence et sert de repère (lignes pointillées). Les résultats donnent raison à l'objection : à $\times 2$, le coût du MRP touche son minimum (41 958, soit 30 % sous le DDMRP)

pour un service de 97,6 % ; à $\times 3$, il rejoint le service du DDMRP (99,5 %) en restant 26 % moins cher. Quand la moyenne ne bouge pas et qu'on la connaît d'avance, une protection fixe bien dimensionnée est la solution la plus efficace (Silver et al., 1998).

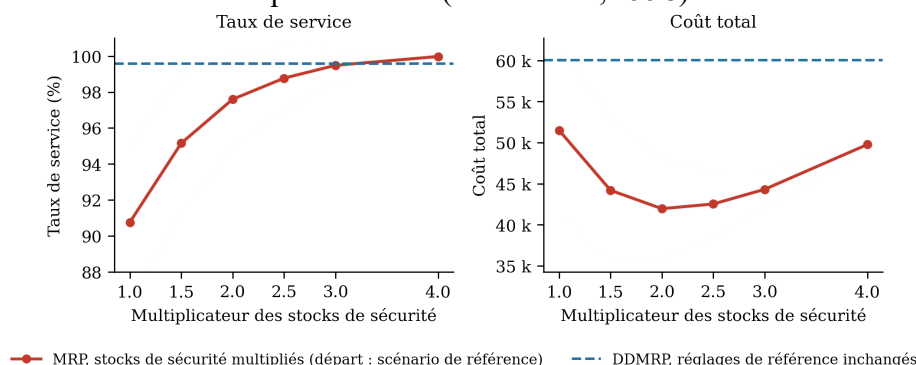


Figure 9 : Sensibilité aux stocks de sécurité du MRP, à partir du scénario de référence (environnement inchangé) ; SS des produits finis multipliés de $\times 1$ (40 et 90 unités) à $\times 4$, DDMRP de référence en repère. Moyennes de vingt répliques.

Ce résultat appelle deux précisions. D'abord, l'environnement n'a pas bougé : c'est toujours le scénario de référence (Tableau 3), et les stocks de sécurité de départ n'ont rien d'arbitraire, ils appliquent la règle admise, deux écarts-types hebdomadaires pour PF1 et trois pour PF2, pics compris (Silver et al., 1998). Les multiplier revient donc à quitter cette règle pour une valeur qu'aucune théorie ne donne et que seule la simulation révèle : il faut déjà connaître la réponse pour la choisir. Ensuite, ce multiplicateur ne vaut que pour cet environnement précis, raison pour laquelle les expériences qui suivent laissent les stocks de sécurité à $\times 1$, comme tous les autres réglages.

7.2 E1. La variabilité seule : le MRP tient

Pour rappel, E1 fait varier la seule variabilité de la demande (chapitre 6.5) ; la Figure 10 en parcourt six niveaux, du plus calme au plus agité. Au niveau le plus calme, les deux méthodes servent 100 % de la demande, mais le MRP coûte 42 % de moins : dans un monde calme, sa prévision est presque toujours juste, et les buffers du DDMRP sont une assurance payée toute l'année contre un risque qui ne se produit jamais.

Quand la variabilité augmente, la Figure 10 montre deux comportements opposés. Le DDMRP reste plat : service à 100 %, coût quasi constant. Le MRP s'érode progressivement, 97,7 % de service au niveau fort, et son coût remonte dès que les premières ruptures apparaissent (4 937 de coûts de rupture, contre 65 au DDMRP). Le stock moyen, au graphique central, bouge à peine des deux côtés : la variabilité ne force personne à stocker beaucoup plus. Le MRP se dégrade donc sans s'effondrer, pour une raison précise : la variabilité n'a pas de mémoire. Un jour de forte demande est suivi de jours normaux, le manque est comblé à la livraison suivante, et le stock de sécurité, dimensionné précisément sur cet écart-type (Silver et al., 1998), absorbe l'essentiel.

Précisons que ce constat dépend de l'hypothèse d'un PF1 bien plus stable que PF2 : si on l'imagine aussi volatil, le MRP décroche bien plus fort, jusqu'à coûter plus cher que le DDMRP (voir Annexe 3). Il faudra autre chose pour le faire tomber : des événements que sa prévision ne peut pas voir à temps.

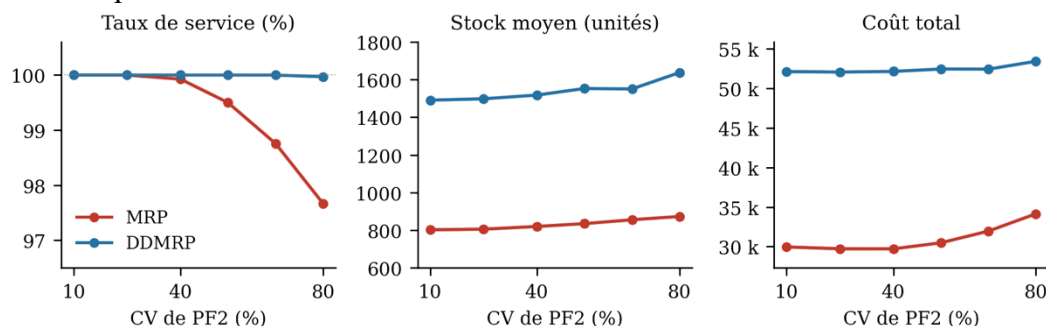


Figure 10 : Expérience E1, six niveaux de variabilité croissante sans commandes exceptionnelles ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt répliques.

7.3 E2. Les commandes exceptionnelles : le premier décrochage

Pour rappel, E2 fait varier la fréquence des grosses commandes de PF2 (chapitre 6.5), PF1 gardant ses 2 %. Cette fois, le service du MRP décroche : la Figure 11 le montre glisser de 97,1 % sans pics à 87,7 % au niveau le plus fréquent, quand le DDMRP reste au-dessus de 99,6 % partout. Le mécanisme reste celui du scénario de référence : la grosse commande est annoncée deux semaines à l'avance, assez pour assembler le produit fini, pas assez pour racheter le composant C1. Le choc est donc encaissé par les stocks existants, qui se vident, et les commandes suivantes trouvent une protection affaiblie. Plus les pics sont fréquents, moins le système a le temps de se reconstituer entre deux coups.

Le coût évolue dans le même sens. Le MRP paie chaque pic manqué en coûts de rupture : sa courbe grimpe presque du simple au double, et l'écart entre les deux méthodes se réduit, de 33 % sans pics à 5 % au niveau le plus fréquent. Celle du DDMRP monte beaucoup plus lentement, ses buffers étant conçus pour absorber ce type de chocs (Ptak & Smith, 2016). Le graphique central montre les deux stocks augmenter, mais pas pour les mêmes raisons : le MRP doit rattraper les commandes qu'il n'a pas servies, et sa prévision monte parce que les pics gonflent l'historique récent (ce qui augmente le stock puisque les prévisions sont surestimées) ; le DDMRP, lui, élargit ses zones parce que la consommation moyenne qu'il observe a augmenté. La décomposition des coûts montre l'origine de ces hausses : la hausse du MRP est presque entièrement faite de ruptures (6 203 à 31 347), celle du DDMRP presque entièrement de possession (38 407 à 50 988). Les commandes exceptionnelles sont ainsi le premier facteur qui rattrape le MRP sur son propre terrain, le coût, tout en le faisant reculer sur le service. Et comme pour la variabilité, l'hypothèse d'un PF1 épargné compte : si les pics frappent les deux produits à la même fréquence, l'avantage de coût du MRP disparaît dès 6 % (voir Annexe 4).

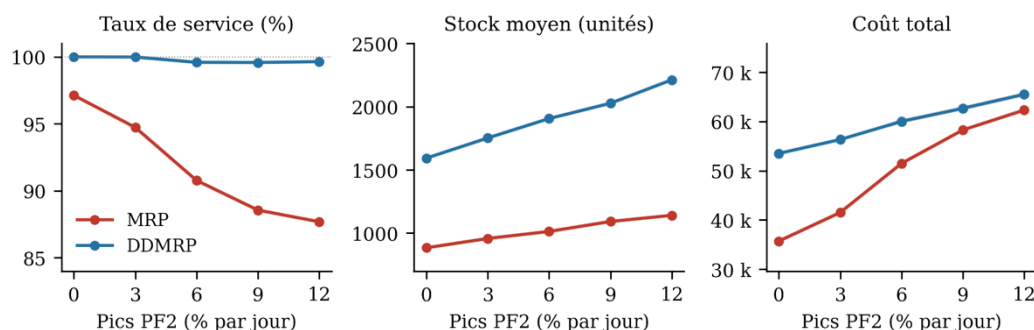


Figure 11 : Expérience E2, fréquence des commandes exceptionnelles de PF2 de 0 à 12 % par jour, cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt répliques.

7.4 E3. Le délai du composant critique : l'erreur qui porte plus loin

Pour rappel, E3 allonge le délai d'achat de C1 (chapitre 6.5). Le service du MRP se dégrade régulièrement : la Figure 12 le montre glisser de 93,1 % à dix jours jusqu'à 87,3 % à trente, quand le DDMRP ne bouge pas, 99,5 à 99,7 % partout. L'explication tient au délai lui-même : plus il est long, plus une erreur de prévision agit longtemps avant d'être corrigée (Vollmann et al., 2005). Si le buffer C1 du DDMRP s'élargit, ce n'est pas un recalibrage : c'est sa formule fixe qui, nourrie d'un délai plus long, produit une protection plus grande (Ptak & Smith, 2016) ; le MRP applique le même délai, mais sa protection garde la même taille.

Cette immunité a un prix qui grandit avec le délai. Pour couvrir trente jours, le buffer C1 porte six semaines de consommation : le stock DDMRP passe de 1 314 à 2 774 unités, plus du double (graphique central de la Figure 12), celui du MRP restant autour de 1 000. Le coût suit, les deux courbes montant presque en parallèle, l'écart restant autour de 8 500, mais pas pour les mêmes raisons, que ce graphique central explique : le DDMRP paie le stock qu'il accumule, 38 610 à 53 973 de possession, quand le MRP, dont le stock ne bouge pas, paie ses ruptures, 16 221 à 29 767. Le buffer neutralise donc l'effet du délai sur le service, pas sur le coût.

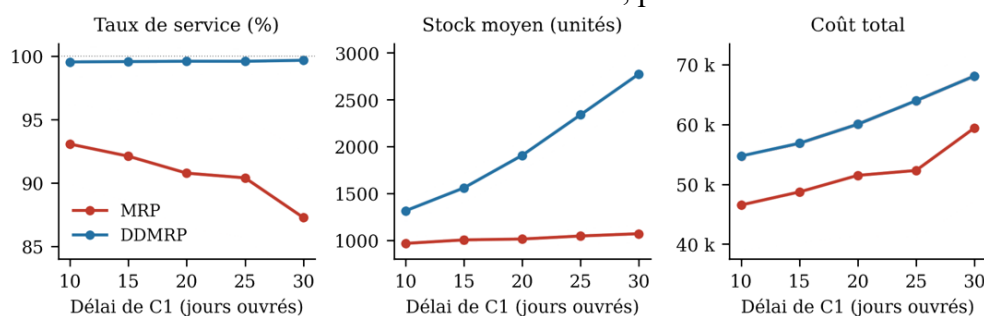


Figure 12 : Expérience E3, délai d'achat de C1 de 10 à 30 jours ouvrés, cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt répliques.

7.5 E4. La saisonnalité : quand la moyenne elle-même se met à bouger

Pour rappel, E4 fait onduler la moyenne de la demande elle-même (chapitre 6.5). La Figure 13 parcourt cinq amplitudes de saison, de zéro à $\pm 40\%$: le service du MRP plonge de 90,8 % à 68,8 %, en passant par 76,6 % à $\pm 30\%$ (62,6 % sur PF2) ; c'est, de toutes les expériences menées jusqu'ici, son plus mauvais résultat. C'est le cas où la demande passée cesse de renseigner sur la demande à venir : la prévision du MRP, moyenne des quatre dernières semaines, suit la saison

avec retard ; surtout, son stock de sécurité, calibré sur la demande moyenne de l'année, devient trop petit pendant toute la saison haute et trop grand pendant toute la saison basse. Contrairement à la variabilité, l'erreur de prévision ne se compense pas d'un jour à l'autre : elle va dans le même sens pendant toute la montée, et les ruptures se répètent semaine après semaine (Silver et al., 1998). Le DDMRP tient : son ADU suit la même vague avec le même retard, mais ses zones se redimensionnent avec elle (Ptak & Smith, 2016), et la protection reste de la bonne taille en toute saison ; il ne cède que légèrement aux amplitudes extrêmes (97,2 % à ± 40 %).

Le coût bascule pour la première fois : les deux courbes se croisent entre ± 10 et ± 20 % d'amplitude, et à ± 30 % le MRP, pourtant deux fois moins stocké (graphique central), est devenu la méthode la plus chère, 85 228 contre 67 293, le DDMRP coûtant 21 % de moins ; à ± 40 %, l'écart dépasse 30 %. La décomposition montre pourquoi : 54 607 de coûts de rupture, près des deux tiers de sa facture, contre 4 156 au DDMRP, qui paie surtout la possession de ses buffers (49 865). Et aucun stock de sécurité fixe ne règle ce problème à bon compte : pour tenir la saison haute, il faudrait le tailler sur le pic, donc le payer toute l'année, y compris pendant la saison basse où il ne sert à rien (Silver et al., 1998). La saisonnalité est ainsi le terrain où l'idée centrale du DDMRP, une protection qui respire avec la demande, cesse d'être un confort coûteux pour devenir l'option la plus économique.

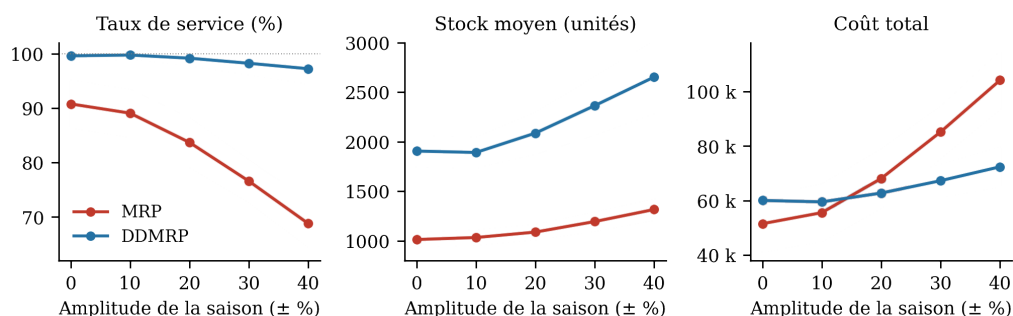


Figure 13 : Expérience E4, amplitude de la saison de 0 à ± 40 % (période de 26 semaines), cinq niveaux ; taux de service, stock moyen et coût total, moyennes de vingt répliques.

Ici encore, une objection s'impose. Le retard du MRP vient de sa prévision par moyenne mobile, qui ignore la saison ; or il existe des méthodes de prévision qui la modélisent (Silver et al., 1998 ; Chopra & Meindl, 2015). La Figure 14 rejoue donc l'expérience à l'identique, avec un troisième acteur : un MRP dont l'entreprise a étudié le profil saisonnier, qui désaisonnalise sa moyenne mobile avant de la projeter sur chaque semaine cible et indexe ses stocks de sécurité sur la saison. L'effet est net : ce MRP étudié devient insensible à l'amplitude, service stable autour de 91 % et coût inférieur à celui du DDMRP à tous les niveaux testés.

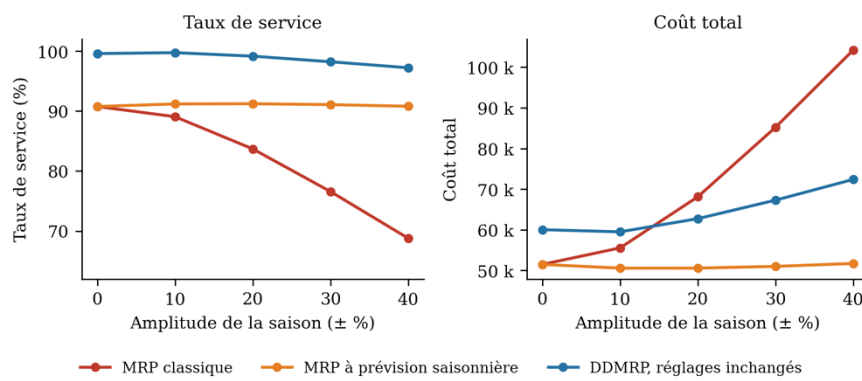


Figure 14 : L'expérience E4 rejouée à l'identique avec, en plus, un MRP à prévision saisonnière et stocks de sécurité indexés sur la saison ; moyennes de vingt réplifications.

Ce résultat suppose lui aussi un changement des paramètres fixés qui doit se faire via une étude préalable, et un profil saisonnier qui reste stable : si la saison se déplace, le retard revient. Cette solution revient surtout à rendre la protection du MRP dynamique, une prévision qui suit la demande et des stocks de sécurité qui varient avec elle, précisément l'idée que le DDMRP a systématisée (Ptak & Smith, 2016 ; Kortabarria et al., 2018).

7.6 E5. Le stress combiné : tout à la fois

Pour rappel, E5 cumule les quatre dégradations (chapitre 6.5). La Figure 15 fait monter l'intensité par paliers, de zéro, où l'on retrouve le scénario de référence, à 100 %, où la variabilité et le délai atteignent le dernier niveau de E1 et de E3, les pics de PF2 celui de E2, ceux de PF1 doublant, et la saison ± 30 %, un cran sous le maximum de E4. Le MRP glisse de 90,8 % à 67,8 % (56,9 % sur PF2), quand le DDMRP ne descend jamais sous 98,8 %. Concrètement, le MRP livre en retard près d'une unité demandée sur trois, le DDMRP une sur cent. Les faiblesses identifiées dans E1 à E4 se renforcent : des pics plus fréquents, sur une demande plus nerveuse dont la moyenne bouge, avec un délai de rattrapage plus long.

Le coût sépare cette fois nettement les deux méthodes : les courbes se croisent avant la mi-parcours, puis l'écart s'ouvre jusqu'à 118 000 contre 91 268 au stress complet, le DDMRP coûtant 23 % de moins, et cet écart, le plus large de toutes les expériences, porte sur des moyennes de vingt réplifications (Law & Kelton, 2000). La composition des factures dit tout : le MRP paie 84 840 de ruptures, plus de 70 % de sa facture, quand le DDMRP paie 76 122 de possession pour un stock de 4 396 unités, près du triple. Sous stress complet, la protection massive du DDMRP n'est plus un luxe : les ruptures qu'elle évite coûtent bien plus cher que le stock qu'elle exige. La gradation est ainsi bouclée : plus l'environnement se dégrade, plus l'arbitrage se déplace, jusqu'au renversement complet.

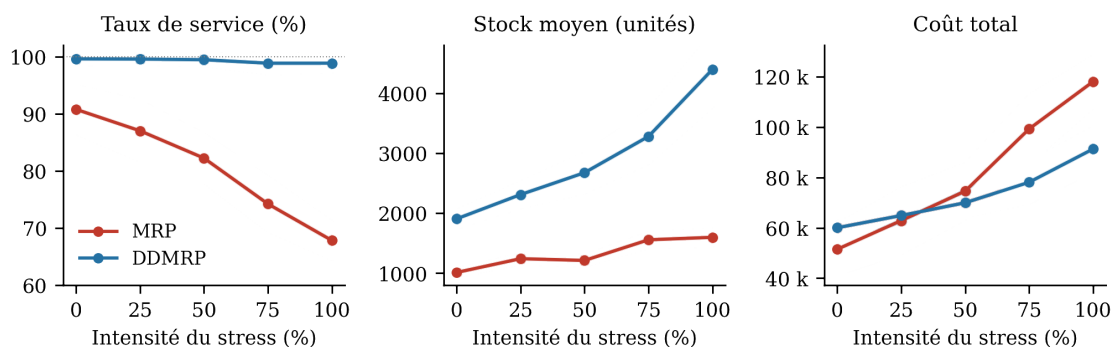


Figure 15 : Expérience E5, intensité du stress de 0 % (référence) à 100 % (variabilité forte, pics fréquents, délai de 30 jours et saison ± 30 % simultanés), cinq niveaux ; moyennes de vingt réplifications.

8. Synthèse : quelle méthode pour quel environnement ?

Cinq expériences, un même enseignement. Tant que la demande fluctue autour d'un niveau moyen qui ne change pas (on dit qu'elle est stationnaire), le MRP tient son rang, car son stock de sécurité absorbe la variabilité (Silver et al., 1998). Il décroche quand l'information arrive trop tard (les pics), quand l'erreur de prévision porte plus loin (le délai), et surtout quand la moyenne elle-même bouge (la saison). Aucune méthode ne domine partout, ce que la littérature laissait attendre (Miclo et al., 2019), et le Tableau 7 traduit ces résultats en règles simples.

Situation	Méthode	Ce que montre la simulation
La demande est calme et prévisible	MRP	Même service que le DDMRP, mais 46 % de stock et 42 % de coût en moins (E1).
La demande saute d'un jour à l'autre, sans saisonnalité	MRP	Le service MRP reste à 97,7 % et son coût reste nettement inférieur (E1).
Les clients passent souvent de grosses commandes	DDMRP	Le service MRP tombe à 87,7 % ; le DDMRP tient 99,6 % et l'écart de coût devient presque nul (E2).
Le composant critique a un long délai d'achat	DDMRP	Le DDMRP protège le service (99,5 % au minimum), mais son stock grandit avec le délai (E3).
La demande a des saisons	DDMRP	Le DDMRP suit le mouvement : 98,2 % de service contre 76,6 %, pour un coût plus faible (E4).
Tout se dégrade en même temps	DDMRP	98,8 % de service contre 67,8 %, et un coût inférieur de 23 % (E5).
Priorité : immobiliser le moins d'argent possible en stock	MRP	Le stock MRP est le plus faible dans tous les scénarios, mais au prix des ruptures.
Priorité : ne jamais décevoir les clients	DDMRP	Au moins 97 % de service dans tous les scénarios testés, sans jamais retoucher les réglages.

Tableau 7 : Matrice de décision issue des cinq expériences.

Deux fois, dans le scénario de référence et dans E4, le MRP a pourtant repris l'avantage dès qu'on lui accordait un réglage de plus. Ces deux résultats ont un point commun : chacun suppose une étude préalable, refaite à chaque évolution du marché, et chacun revient à rendre la protection du MRP dynamique. La vraie question est donc de savoir si l'entreprise a les moyens humains et informatiques d'analyser sa demande régulièrement pour reparamétrer son MRP, et si ce travail ne coûte pas plus cher qu'il ne rapporte. Reste à vérifier que ces conclusions ne tiennent pas aux hypothèses du modèle lui-même : c'est l'objet du chapitre suivant.

9. La robustesse des conclusions

Les conclusions qui précèdent ont été obtenues dans un environnement précis, avec des réglages précis et sous certaines hypothèses de modélisation. Il reste à vérifier qu'elles ne tiennent pas à ces choix. Cinq hypothèses ont donc été modifiées une à une, et quatre scénarios ont été rejoués à chaque fois : l'environnement calme (E1), où le MRP sert aussi bien que le DDMRP pour beaucoup moins cher, la référence, la saisonnalité (E4), où le DDMRP sert mieux que le MRP

tout en coûtant moins cher, et le stress combiné (E5). Le Tableau 8 résume les effets observés. Les valeurs complètes, ainsi que la nomenclature de l'hypothèse 5, figurent en Annexe 5.

Hypothèse modifiée	Ce que l'on observe	Effet sur les conclusions
1. Ventes perdues au lieu de reliquats : la demande non servie le jour même est perdue	En calme(E1), les deux méthodes servent toujours 100 % ; le MRP remonte à 96,2 % en référence et 85,7 % sous stress(E5) ; le DDMRP reste entre 98,9 et 99,8 %	Écart réduit, hiérarchie identique
2. Coût de rupture divisé par deux : une unité non servie coûte 12,5 au lieu de 25	Aucun effet en calme(E1), où il n'y a pas de rupture ; sous saison(E4), le MRP coûte 57 925 contre 65 215 au DDMRP, et 75 580 contre 89 726 sous stress(E5)	Le DDMRP n'est plus le moins cher sous saison ni sous stress
3. Coût de rupture doublé : une unité non servie coûte 50 au lieu de 25	Aucun effet en calme(E1) ; sous saison(E4), le MRP coûte 139 835 contre 71 450 au DDMRP	L'avantage de coût du DDMRP est amplifié
4. Autres placements des buffers : (4') ajout sur SA, (4'') ajout sur C3, (4''') puis sur tous les articles	Service du DDMRP de 100 % en calme(E1) et entre 97,3 % et 99,7 % ailleurs ; aucun placement des buffers ne change la conclusion	Conclusions inchangées
5. Autre nomenclature : deux branches indépendantes, sans sous-ensemble partagé	En calme(E1), 100 % des deux côtés et MRP moins cher (30 085 contre 46 602) ; le MRP passe à 78,6 % en E5, le DDMRP tient 99,1 %	Conclusions identiques même avec une autre chaîne

Tableau 8 : Effet de cinq changements d'hypothèse sur les conclusions du chapitre.

Le premier résultat concerne l'environnement calme (E1) : dans les cinq tests, les deux méthodes servent 100 % de la demande, et le MRP y reste toujours beaucoup moins cher : 29 959 contre 52 122 pour le DDMRP avec les hypothèses du mémoire. Même en plaçant les buffers autrement sur la chaîne du mémoire (hypothèse 4), le coût du DDMRP en environnement calme ne descend pas plus bas que 51 824, toujours très au-dessus de celui du MRP ; et sur l'autre nomenclature (hypothèse 5), l'écart se retrouve dans les mêmes proportions, 30 085 pour le MRP contre 46 602 pour le DDMRP. La conclusion du chapitre tient donc : quand la demande est calme, les buffers du DDMRP ne servent à rien et se paient.

Le deuxième enseignement est que la conclusion sur le service ne dépend d'aucune de ces hypothèses : dans les cinq tests, le DDMRP sert toujours mieux que le MRP dès que l'environnement se dégrade. Seul l'écart varie, et c'est le test des ventes perdues (hypothèse 1), où le MRP paraît le plus se redresser, qui mérite une explication. Dans le stress combiné (E5), le MRP sert 67,8 % avec les reliquats du mémoire et 85,7 % en ventes perdues. Il ne livre pourtant pas une unité de plus : avec les reliquats, la commande non servie revient s'ajouter à la demande des jours suivants, alors qu'en ventes perdues elle disparaît. L'écart se resserre parce que la mesure change, pas la méthode. Dans les deux cas, le DDMRP sert plus de 98 %.

L'hypothèse 5, le changement de nomenclature, mérite un mot, car elle répond à l'objection la plus directe : dans la nomenclature du mémoire, les deux produits finis partagent le sous-ensemble SA et dépendent tous deux du composant C1, celui dont le délai est le plus long. Un seul buffer bien placé protège donc les deux produits à la fois, ce qui pourrait avantager le DDMRP. La chaîne testée dans l'hypothèse 5 a la même taille, mais aucun article n'y est partagé : chaque produit fini a sa propre branche et son propre composant acheté (voir nomenclature en Annexe 5). Les deux

méthodes y sont recalibrées avec les mêmes règles qu’au chapitre 6. Les conclusions sont les mêmes que dans le mémoire : le service du MRP tombe de 95,2 % dans le scénario de référence à 78,6 % sous stress, celui du DDMRP ne descend pas sous 99,1 %, et le DDMRP coûte moins cher que le MRP dès que la demande devient saisonnière.

Le troisième enseignement concerne le coût, et il demande de la prudence. Dans le mémoire, une unité non livrée à temps coûte 25 à l’entreprise. C’est ce chiffre qui permet au DDMRP de devenir moins cher que le MRP sous saisonnalité (E4) : le MRP y sert 76,6 % de la demande, et ses ruptures lui coûtent plus cher que le stock supplémentaire du DDMRP. Si l’on abaisse ce coût à 12,5 (hypothèse 2), les ruptures du MRP lui coûtent deux fois moins, et c’est lui qui redevient le moins cher sous saisonnalité, 57 925 contre 65 215, comme sous stress combiné, 75 580 contre 89 726. Si on le porte à 50 (hypothèse 3), l’écart se creuse au contraire en faveur du DDMRP, 139 835 contre 71 450. Autrement dit, le service du DDMRP reste meilleur dans tous les cas, mais son avantage de coût n’apparaît en E4 que si l’entreprise chiffre haut le coût de rupture. Aucun de ces tests ne renverse la conclusion sur le service ; celle sur le coût tient au prix de la rupture.

10. Les limites du modèle

Ces conclusions valent dans le cadre du modèle, dont il faut nommer les limites. La chaîne ne compte que **six articles**, choisis pour garder chaque mécanisme lisible, comme les études comparables (Miclo et al., 2019), quand une nomenclature industrielle en compte des milliers. Les **délais sont déterministes** et les **fournisseurs parfaits** : la seule incertitude du modèle est la demande. Ce choix, fait pour isoler la variable étudiée, avantage le MRP, puisqu’une partie de la valeur du DDMRP vient en pratique de l’absorption des aléas d’approvisionnement (Ptak & Smith, 2016) ; les conclusions favorables au DDMRP sont donc prudentes plutôt que fragiles. Les montants de coûts ne proviennent pas d’une entreprise réelle, seuls leurs rapports importent. La **capacité de production** est illimitée. La comparaison ignore enfin la **complexité organisationnelle** des deux méthodes (formation, logiciels, conduite du changement). Pour rappel, les résultats sont des moyennes de vingt répliques (chapitre 5.2.3) : un **écart-type** subsiste autour de chacune, plus élevé sur les coûts que sur le service, ce qui invite à la prudence sur les petits écarts de coût sans remettre en cause l’ensemble. Ces limites posées, reste à rassembler ce que la théorie annonçait et ce que la simulation a montré.

11. Conclusion générale

La partie théorique laissait attendre deux profils opposés (Tableau 1) : un MRP précis et économe en stock tant que la demande reste prévisible, un DDMRP robuste face à l’incertitude mais plus lourd en stock, sans dire ni de combien, ni à partir de quand. La simulation ajoute cette ampleur

et ce point de bascule. Elle confirme l'essentiel de ces attentes, avec une nuance : dans cette simulation, la seule variabilité de la demande ne fait pas décrocher le MRP, qui conserve 97,7 % de service pour un coût inférieur. Ce constat tient toutefois à l'hypothèse d'un PF1 bien plus stable que PF2 : quand les deux deviennent aussi volatils, son service tombe jusqu'à 85,7 % et son coût finit par dépasser celui du DDMRP (Annexe 3).

Sur la performance, la première question demandait comment le service, le stock et le coût évoluent selon l'environnement. Le coût ne se forme pas au même endroit : le MRP garde un stock faible et accumule des coûts de rupture, le DDMRP immobilise un stock permanent et maintient son taux de service. Tant que l'environnement reste calme, le coût total du MRP est le plus bas ; sous saison et sous stress, ses coûts de rupture dépassent le coût des buffers du DDMRP.

Sur la résilience, la deuxième question demandait laquelle les maintient le mieux quand l'environnement se durcit, à réglages inchangés. Le service du DDMRP ne descend pas sous 97,2 %, celui du MRP s'étage de 100 % à 67,8 %. La cause est précise : le MRP fige la taille de sa protection, le DDMRP fige seulement la règle qui la calcule.

Aucune méthode ne domine donc partout, nuance que l'évaluation académique du DDMRP n'avait pas tranchée (Miclo et al., 2019). Le Tableau 7 du chapitre 8 réunit les conditions dans lesquelles chacune performe le mieux : une entreprise à demande stable n'a aucune raison de payer des buffers permanents ; face aux commandes exceptionnelles et aux délais longs, le DDMRP protège le service, et sous saisonnalité comme sous stress il coûte aussi moins cher. Le constat sur le service résiste aux cinq changements du chapitre 9 ; celui sur le coût tient au prix de la rupture.

Une réserve enfin : les paramètres des deux méthodes restent fixés partout, l'objet étant de mesurer comment un environnement qui change dégrade des réglages qui ne changent pas. Lever cette contrainte côté MRP change le verdict : tripler ses stocks de sécurité lui rend un service équivalent à celui du DDMRP (99,5 %) pour 26 % de coût en moins (Figure 9) ; une prévision saisonnière tient 91 % sous saison, à coût partout inférieur au DDMRP (Figure 14). Mais ces réglages ne se déduisent d'aucune formule : chacun suppose une étude de la demande, refaite à chaque évolution du marché : du temps, des compétences et un coût que la simulation ne chiffre pas. D'où deux prolongements : chiffrer ce coût, et introduire des fournisseurs imparfaits, qui toucheraient surtout le MRP (Christopher & Peck, 2004).

Références bibliographiques

- APICS. (2023). *The APICS Dictionary* (17th ed.). Association for Supply Chain Management.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2015). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson.
[https://rudycr.com/supchn/Supply%20chain%20management%20strategy,%20planning,%20and%20operation%20\(Chopra,%20Sunil%20Meindl,%20Peter%20Vir%20Kalra,%20Dharam\)2016.pdf](https://rudycr.com/supchn/Supply%20chain%20management%20strategy,%20planning,%20and%20operation%20(Chopra,%20Sunil%20Meindl,%20Peter%20Vir%20Kalra,%20Dharam)2016.pdf)
- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. *International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1–14.
https://www.researchgate.net/publication/228559011_Building_the_Resilient_Supply_Chain
- Disney, S. M., & Towill, D. R. (2003). On the bullwhip and inventory variance produced by an ordering policy. *Omega*, 31(3), 157–167.
https://www.researchgate.net/publication/223739658_On_the_bullwhip_and_inventory_variance_produced_by_an_ordering_policy
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362.
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2649-2>
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.
https://www.researchgate.net/publication/3422921_Matplotlib_A_2D_Graphics_Environment
- Kortabarria, A., Apaolaza, U., Lizarralde, A., & Amorrortu, I. (2018). Material management without forecasting: From MRP to demand driven MRP. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(4), 632–650.
<https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/2654/876>
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis* (3rd ed.). McGraw-Hill. <https://www.scribd.com/doc/183638869/McGraw-Hill-Simulation-Modeling-and-Analysis-Third-Edition-Averill-M-Law-W-David-Kelton-pdf>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93–102. <https://sloanreview.mit.edu/article/the-bullwhip-effect-in-supply-chains/>

- Miclo, R., Lauras, M., Fontanili, F., Lamothe, J., & Melnyk, S. A. (2019). Demand Driven MRP: assessment of a new approach to materials management. *International Journal of Production Research*, 57(1), 166–181. <https://imt-mines-albi.hal.science/hal-01968744/document>
- Orlicky, J. (1975). *Material Requirements Planning: The new way of life in production and inventory management*. McGraw-Hill.
<https://www.scribd.com/document/745786938/Orlicky-s-Material-Requirements-Plann-Z-Library>
- Ptak, C. A., & Smith, C. D. (2016). *Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP)*. McGraw-Hill Education. [https://cdn.oujdalibrary.com/books/89/89-ddmrp-demand-driven-material-requirements-planning-\(www.tawcer.com\).pdf](https://cdn.oujdalibrary.com/books/89/89-ddmrp-demand-driven-material-requirements-planning-(www.tawcer.com).pdf)
- Silver, E. A., Pyke, D. F., & Peterson, R. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
https://www.researchgate.net/publication/229124356_Inventory_Management_and_Production_Scheduling
- Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 reference manual*. CreateSpace.
<https://docs.python.org/3/reference/>
- Vollmann, T. E., Berry, W. L., Whybark, D. C., & Jacobs, F. R. (2005). *Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.
https://books.google.be/books?id=6jKx5QFipIAC&printsec=frontcover&hl=nl&source=gs_l_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Annexe 1 : calcul des tailles de lot et des intervalles de commande

Cette annexe détaille le calcul qui fixe la politique de lotissement de chaque article du MRP simulé : la quantité économique du composant C1 et les intervalles de regroupement de SA, C2 et C3. Tout repose sur la formule de la quantité économique, présentée dans la partie théorique (Silver et al., 1998) et appliquée quatre fois, suivie d'une vérification finale du coût de l'arrondi.

Étape 1 : la consommation moyenne hebdomadaire de chaque article

La formule de la quantité économique a besoin de la demande moyenne D de l'article. Pour les composants, cette demande découle de celle des produits finis, à travers les coefficients de la nomenclature.

La demande journalière moyenne d'un produit fini combine sa consommation de base et ses commandes exceptionnelles, dont la taille moyenne est de 50 unités, entre 30 et 70, et la

probabilité d'apparition de 2 % par jour pour PF1 et de 6 % pour PF2. Ramenée à une semaine de cinq jours ouvrés :

$$D_{PF1} = (20 + 0,02 \times 50) \times 5 = 105 \text{ unités/semaine}$$

$$D_{PF2} = (12 + 0,06 \times 50) \times 5 = 75 \text{ unités/semaine}$$

Les consommations hebdomadaires des composants s'en déduisent par la nomenclature : SA entre une fois dans chaque produit fini, C2 deux fois dans PF1, C3 une fois dans PF2 et C1 deux fois dans SA.

$$D_{SA} = 105 + 75 = 180$$

$$D_{C2} = 2 \times 105 = 210$$

$$D_{C3} = 75$$

$$D_{C1} = 2 \times 180 = 360$$

Étape 2 : la quantité économique de chaque article

La quantité économique Q^* équilibre le coût de passation et le coût de possession (Silver et al., 1998). Commander en gros lots revient à payer peu de frais de commande mais à stocker longtemps, commander en petits lots produit l'effet inverse, et Q^* est le point exact où les deux forces se compensent (Silver et al., 1998). Sur une période, ce coût total additionne deux postes (Silver et al., 1998). D'un côté, il faut passer D/Q commandes, chacune coûtant s (Silver et al., 1998). De l'autre, le stock oscille entre Q et zéro, il vaut donc $Q/2$ en moyenne, et chaque unité coûte h (Silver et al., 1998) :

$$CT(Q) = \frac{sD}{Q} + \frac{hQ}{2}$$

Le premier terme diminue quand la taille du lot grandit, le second augmente : c'est la courbe en U de la Figure 3 (Silver et al., 1998). La quantité la moins chère s'obtient en annulant la dérivée de cette somme (Silver et al., 1998) :

$$Q^* = \sqrt{\frac{2Ds}{h}}$$

où D est la demande hebdomadaire, s le coût fixe d'une commande, en euros par commande, et h le coût de possession, en euros par unité et par semaine. D et h étant tous deux exprimés par semaine, les unités sont cohérentes. Avec les valeurs du Tableau 2 :

$$Q_{SA}^* = \sqrt{\frac{2 \times 180 \times 75}{0,50}} = \sqrt{54\,000} \approx 232 \text{ unités}$$

$$Q_{C2}^* = \sqrt{\frac{2 \times 210 \times 80}{0,10}} = \sqrt{336\,000} \approx 580 \text{ unités}$$

$$Q_{C3}^* = \sqrt{\frac{2 \times 75 \times 80}{0,15}} = \sqrt{80\,000} \approx 283 \text{ unités}$$

$$Q_{C1}^* = \sqrt{\frac{2 \times 360 \times 100}{0,20}} = \sqrt{360\,000} = 600 \text{ unités}$$

Étape 3 : convertir la quantité en intervalle de temps

C1 conserve une politique en quantité fixe, avec des lots de 600 unités recalculés chaque semaine puisque la demande estimée évolue. Pour SA, C2 et C3, la politique retenue est le period order quantity, qui s'exprime en temps. Un lot de Q^* unités consommé au rythme de D unités par semaine couvre un intervalle I , arrondi ensuite à la semaine entière (APICS, 2023) :

$$I = \frac{Q^*}{D}$$

$$I_{SA} = \frac{232}{180} \approx 1,3 \text{ semaine}$$

$$I_{C2} = \frac{580}{210} \approx 2,8 \text{ semaines}$$

$$I_{C3} = \frac{283}{75} \approx 3,8 \text{ semaines}$$

Arrondis à la semaine entière, ces intervalles donnent 1 semaine pour SA, 3 semaines pour C2 et 4 semaines pour C3.

Étape 4 : vérifier que l'arrondi ne coûte presque rien

Arrondir 2,8 semaines à 3 revient à commander un peu plus que la quantité idéale. L'écart se déduit de la même fonction de coût : en Q^* , les deux postes sont exactement égaux, si bien que commander k fois Q^* divise le premier par k et multiplie le second par k (Silver et al., 1998). L'effet sur les coûts se calcule exactement. Si l'on commande k fois la quantité économique, où $k = 1,09$ signifie commander 9 % de plus que l'optimum et $k = 0,77$ en commander 23 % de moins, le total des coûts de passation et de possession est multiplié par (Silver et al., 1998) :

$$\frac{\left(k + \frac{1}{k}\right)}{2}$$

Pour C2, $k = 3 / 2,8 = 1,09$, soit un surcoût de 0,3 %. Pour C3, $k = 4 / 3,8 = 1,06$, soit 0,2 %. Pour SA, $k = 1 / 1,3 = 0,77$, soit 3,3 %. Ces écarts, qui ne concernent que les coûts de passation et de possession de l'article, confirment que le coût total est peu sensible autour de son optimum (Silver et al., 1998) et que l'arrondi à la semaine entière est sans conséquence pratique.

Synthèse

Article	D (u/sem.)	s (€/cde)	h (€/u/sem.)	Q* (unités)	Q*/D (sem.)	Politique retenue
SA	180	75	0,50	232	1,3	POQ, 1 semaine
C2	210	80	0,10	580	2,8	POQ, 3 semaines
C3	75	80	0,15	283	3,8	POQ, 4 semaines
C1	360	100	0,20	600	1,7	EOQ, lots de 600

Annexe 2 : calcul détaillé des zones des buffers DDMRP

Cette annexe reconstruit pas à pas les zones et les seuils des trois buffers du scénario de référence. Toutes les formules sont celles de la méthode DDMRP, présentées dans la partie théorique (Ptak & Smith, 2016). Le calcul se déroule en cinq étapes : les données d'entrée, les deux grandeurs de base, puis chacune des trois zones, et enfin les seuils de pilotage.

Les données d'entrée

Aucun nombre de cette annexe n'est nouveau : tous proviennent du scénario défini dans le corps du chapitre :

Le modèle confronte le système à deux produits finis (PF) aux comportements radicalement opposés :

Produit PF1 (Profil Stable) :

- Demande quotidienne : 20 unités en moyenne.
- Commandes exceptionnelles : Rares (2% de probabilité/jour). Taille entre 30 et 70 unités.

Produit PF2 (Profil Volatil) :

- Demande quotidienne : 12 unités en moyenne.
- Commandes exceptionnelles : Fréquentes (6% de probabilité/jour). Taille entre 30 et 70 unités.

Comment les produits sont-ils construits et combien de temps faut-il pour les obtenir (délais exprimés en semaines) ?

Niveau 0 - Assemblage Produits Finis (Délai : 1 semaine)

1 unité de PF1 requiert : 1x SA + 2x C2

1 unité de PF2 requiert : 1x SA + 1x C3

Niveau 1 - Fabrication Sous-ensemble (Délai : 2 semaines)

1 unité de SA requiert : 2x C1

Niveau 2 - Achats de Composants (Délais variables)

Composant C1 : 4 semaines (C'est le composant critique mutualisé).

Composant C2 : 2 semaines.

Composant C3 : 3 semaines.

Seuls trois articles (PF1, PF2 et C1) sont protégés par des Buffers. Voici leurs réglages :

Article (Buffer protégé)	Facteur de Délai (LTF)	Facteur de Variabilité (VF)
PF1 (Produit fini stable)	0,5	0,4
PF2 (Produit fini volatil)	0,4	0,7
C1 (Composant critique)	0,3	0,5

Contraintes du Fournisseur pour le composant C1 :

Quantité minimale : 400 unités par commande.

Fréquence maximale : 1 seule commande autorisée par semaine.

Une précision d'unité est nécessaire : le pilotage DDMRP étant journalier, tous les délais sont convertis en jours ouvrés, à raison de 5 jours ouvrés par semaine. Les délais du Tableau 2 deviennent donc : 5 jours pour PF1 et PF2, 10 jours pour SA et C2, 15 jours pour C3, 20 jours pour C1.

Étape 1 : les deux grandeurs de base

Tout le dimensionnement d'un buffer repose sur deux nombres propres à l'article : sa consommation moyenne journalière et son délai découplé (Ptak & Smith, 2016).

La consommation moyenne journalière (ADU). C'est le rythme auquel l'article sort du stock, en unités par jour (Ptak & Smith, 2016). Pour un produit fini, elle additionne deux contributions (Ptak & Smith, 2016). La première est la demande de base moyenne : 20 unités par jour pour PF1, 12 pour PF2. La seconde est l'apport moyen des commandes exceptionnelles : leur taille moyenne vaut 50 unités, le milieu de la fourchette de 30 à 70, et une commande de 50 unités qui survient 2 % des jours apporte en moyenne $0,02 \times 50 = 1$ unité par jour ; à 6 % des jours, 3 unités par jour. D'où :

$$ADU_{PF1} = 20 + 0,02 \times 50 = 21 \text{ unités/jour}$$

$$ADU_{PF2} = 12 + 0,06 \times 50 = 15 \text{ unités/jour}$$

Pour un composant, la consommation se déduit de la nomenclature. Chaque produit fini consomme 1 sous-ensemble SA, et chaque SA consomme 2 unités de C1 :

$$ADU_{C1} = 2 \times (ADU_{PF1} + ADU_{PF2}) = 2 \times (21 + 15) = 72 \text{ unités/jour}$$

Le délai découplé (DLT). C'est le temps qu'il faut réellement attendre pour reconstituer l'article, en tenant compte des buffers déjà posés : un composant protégé par un buffer est considéré comme

disponible immédiatement, et la chaîne des délais s'arrête sur lui (Ptak & Smith, 2016). Le délai découplé d'un article vaut donc son propre délai, plus le plus long des délais découplés de ses composants non protégés (Ptak & Smith, 2016). En l'appliquant du bas de la nomenclature vers le haut :

Pour C1 : acheté, sans composant, son délai découplé est son délai d'achat, $DLT_{C1} = 20$ jours.

Pour SA : son seul composant, C1, est bufferisé, donc considéré comme disponible ; il ne reste que sa fabrication, $DLT_{SA} = 10$ jours.

Pour PF1 : 5 jours d'assemblage, plus le plus long entre ses deux composants non protégés, SA (10 jours) et C2 (10 jours), soit $DLT_{PF1} = 5 + 10 = 15$ jours.

Pour PF2 : 5 jours d'assemblage, plus le plus long entre SA (10 jours) et C3 (15 jours), soit $DLT_{PF2} = 5 + 15 = 20$ jours.

Étape 2 : la zone jaune, couvrir la consommation pendant le délai

Quand le buffer passe une commande, celle-ci met tout le délai découplé à arriver (Ptak & Smith, 2016). Pendant cette attente, la consommation continue (Ptak & Smith, 2016). La zone jaune représente exactement cette consommation à couvrir : le rythme journalier multiplié par le nombre de jours d'attente (Ptak & Smith, 2016).

$$ZJ = ADU \times DLT$$

$$ZJ_{PF1} = 21 \times 15 = 315$$

$$ZJ_{PF2} = 15 \times 20 = 300$$

$$ZJ_{C1} = 72 \times 20 = 1440$$

Étape 3 : la zone verte, dimensionner les commandes

La zone verte fixe la taille des commandes du buffer : plus elle est grande, plus les commandes sont grosses et espacées (Ptak & Smith, 2016). Sa valeur doit satisfaire trois exigences à la fois, et c'est pourquoi elle se calcule comme un maximum (Ptak & Smith, 2016).

Première exigence, le regroupement économique recommandé par la méthode (Ptak & Smith, 2016) : une fraction de la zone jaune, donnée par le facteur de délai, soit $ZJ \times LTF$. L'idée est qu'un article au délai long porte déjà une grosse zone jaune : une petite fraction suffit à former des commandes de taille raisonnable, d'où un facteur d'autant plus bas que le délai est long (Ptak & Smith, 2016).

Deuxième exigence, la quantité minimale de commande du fournisseur, lorsqu'elle existe (Silver et al., 1998). Le fournisseur de C1 refuse toute commande inférieure à 400 unités : la zone verte de C1 ne peut donc pas être inférieure à 400, sinon le buffer générerait des commandes irrecevables.

Troisième exigence, le cycle minimal de commande, lorsqu'il existe (Silver et al., 1998). Le fournisseur de C1 n'accepte qu'une commande par semaine : chaque commande doit donc couvrir au moins une semaine de consommation, faute de quoi le stock s'épuiserait entre deux commandes autorisées. En unités, cela représente l'ADU multipliée par les 5 jours ouvrés de la semaine.

$$ZV = \max(ZJ \times LTF; MOQ; ADU \times cycle)$$

Application. PF1 et PF2 n'ont ni quantité minimale ni cycle imposé : seule reste l'exigence économique, avec leurs facteurs de délai respectifs de 0,5 et 0,4.

$$ZV_{PF1} = 315 \times 0,5 = 157,5$$

$$ZV_{PF2} = 300 \times 0,4 = 120$$

C1 cumule les trois exigences, avec son facteur de délai de 0,3 : couverture économique $1440 \times 0,3 = 432$; quantité minimale 400 ; cycle d'une semaine $72 \times 5 = 360$. Le plus grand des trois l'emporte :

$$ZV_{C1} = \max(432; 400; 360) = 432$$

Étape 4 : la zone rouge, la réserve de sécurité

La zone rouge est le matelas qui ne devrait pas être entamé en fonctionnement normal (Ptak & Smith, 2016). La méthode la construit en deux couches (Ptak & Smith, 2016). La première, la base, est proportionnelle à l'exposition au délai (Ptak & Smith, 2016) : $ZJ \times LTF$, la même quantité que la part économique de la zone verte. La seconde, la sécurité, majore cette base proportionnellement à la nervosité de la demande : elle vaut la base multipliée par le facteur de variabilité VF (Ptak & Smith, 2016). En additionnant les deux couches, la base se factorise (Ptak & Smith, 2016) :

$$ZR = ZJ \times LTF + ZJ \times LTF \times VF = ZJ \times LTF \times (1 + VF)$$

C'est ce facteur $(1 + VF)$ qui explique les multiplicateurs des calculs suivants : $1 + 0,4 = 1,4$ pour PF1 ; $1 + 0,7 = 1,7$ pour PF2 ; $1 + 0,5 = 1,5$ pour C1.

$$ZR_{PF1} = 315 \times 0,5 \times 1,4 = 220,5$$

$$ZR_{PF2} = 300 \times 0,4 \times 1,7 = 204$$

$$ZR_{C1} = 1440 \times 0,3 \times 1,5 = 648$$

On lit directement l'effet des facteurs : PF2, produit volatil, porte un facteur de variabilité de 0,7 contre 0,4 pour le stable PF1, et sa zone rouge est proportionnellement plus épaisse.

Étape 5 : les seuils de pilotage

Les trois seuils s'obtiennent en empilant les zones, du bas vers le haut : rouge, puis jaune, puis verte (Ptak & Smith, 2016).

$$\text{Sommetrouge} = ZR$$

$$\text{Sommetjaune} = ZR + ZJ$$

$$\text{Sommetvert} = ZR + ZJ + ZV$$

Ce sont eux qui pilotent le buffer au quotidien (Ptak & Smith, 2016) : tant que le flux disponible reste au-dessus du sommet jaune, rien ne se passe ; dès qu'elle passe dessous, une commande part, de la quantité exacte qui ramène la position au sommet vert. Exemple avec PF2, dont les seuils valent 204, 504 et 624 : tant que le flux disponible dépasse 504, aucune commande ; s'il tombe un matin à 470, une commande de $624 - 470 = 154$ unités part le jour même.

Récapitulatif

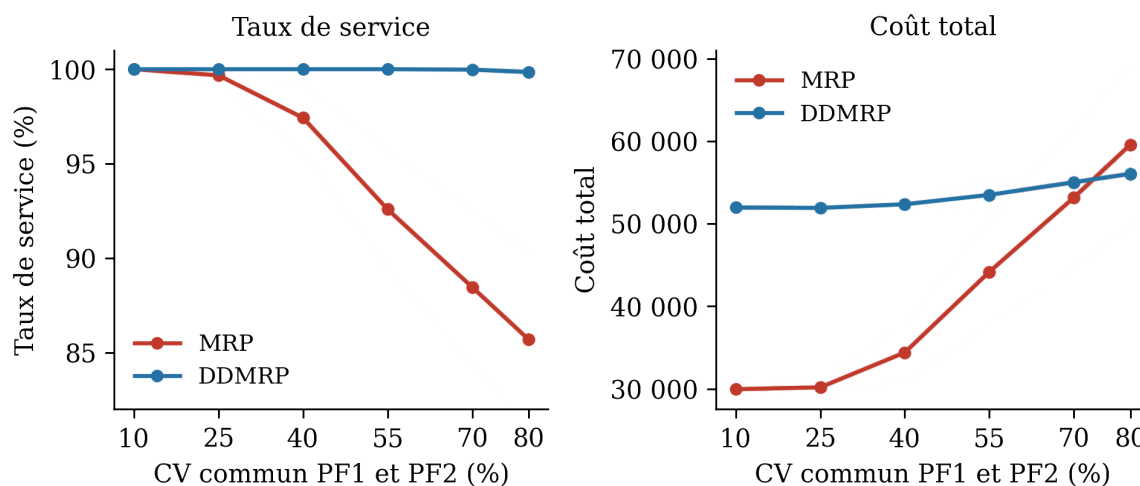
Buffer	ADU (u/j)	DLT (j)	Zone Jaune	Zone Verte	Zone Rouge	Sommet Rouge	Sommet Jaune	Sommet Vert
PF1	21	15	315	157,5	220,5	220,5	535,5	693
PF2	15	20	300	120	204	204	504	624
C1	72	20	1440	432	648	648	2088	2520

Les valeurs rassemblées dans le tableau ci-dessus sont ces seuils, arrondis à l'unité pour PF1. Elles correspondent au calcul initial, fondé sur les consommations moyennes théoriques. En cours de simulation, l'ADU est réestimée chaque semaine comme moyenne mobile des quatre dernières semaines observées, et les zones s'adaptent avec elle ; de même, lorsque le délai de C1 change (expériences E3 et E5), le délai découplé change et les zones se recalculent automatiquement avec la même formule : c'est le caractère dynamique des buffers présenté dans la partie théorique.

Annexe 3 : sensibilité au profil de PF1, un produit stable devenu volatil

Le scénario de référence suppose PF1 stable et PF2 volatil. Cette annexe efface cette différence : les deux produits reçoivent le même coefficient de variation, porté progressivement de 10 % à 80 %, sans commandes exceptionnelles, tous les réglages restant ceux de la référence. Chaque point est la moyenne de vingt réplifications.

Le contraste avec l'expérience E1 est net. Quand PF1 reste bien plus stable que PF2, le service du MRP se maintient à 97,7 % ; quand PF1 s'agite aussi, il tombe à 85,7 % au CV le plus élevé (80 %) et son coût dépasse celui du DDMRP à partir d'environ 70 % (59 591 contre 56 056 au niveau le plus agité). Deux raisons l'expliquent. PF1 est le produit à fort volume : la même variabilité relative y injecte beaucoup plus d'unités d'erreur. Et son stock de sécurité de 40 unités, taillé sur sa demande calme (environ deux écarts-types), n'en couvre plus qu'un seul à CV 80 % : la protection fixe est débordée. Celui de PF2, calibré en incluant la part des commandes exceptionnelles, reste au contraire surdimensionné dans un scénario sans pics. Le DDMRP, lui, ne bouge pas : 99,9 % de service et un coût qui monte à peine, ses zones suivant la consommation observée. Ce résultat renforce la conclusion de l'expérience E1 : le MRP ne souffre pas de la variabilité en soi, il souffre dès qu'elle dépasse ce que sa protection fixe avait prévu.

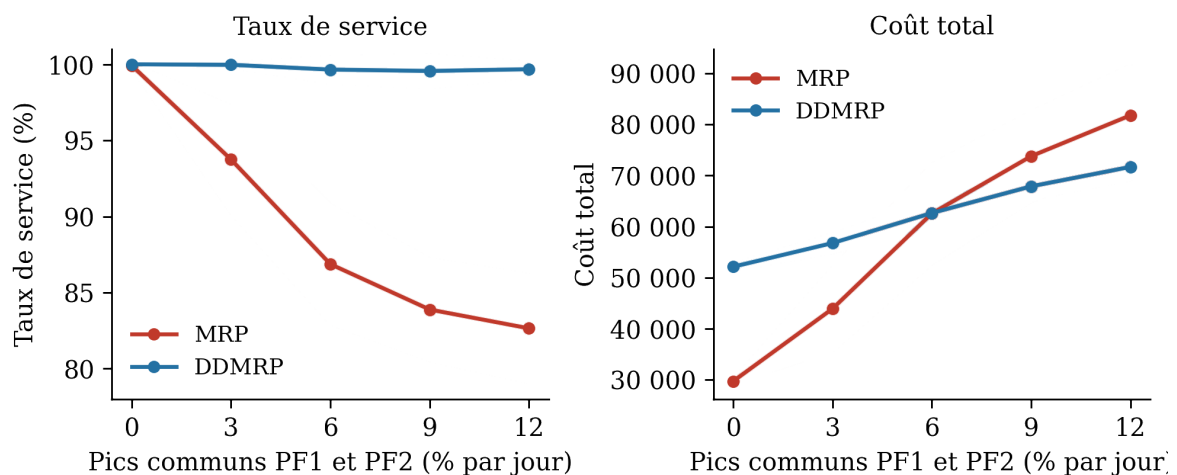


Taux de service et coût total lorsque PF1 et PF2 partagent le même coefficient de variation, moyennes de vingt réplifications.

Annexe 4 : sensibilité au profil de PF1, des pics sur les deux produits

L'expérience E2 fait varier la fréquence des commandes exceptionnelles de PF2 en laissant PF1 presque épargné (2 %). Cette annexe teste le cas où les deux produits sont frappés à la même fréquence, portée ensemble de 0 à 12 %, tous les autres réglages restant ceux de la référence. Chaque point est la moyenne de vingt réplifications.

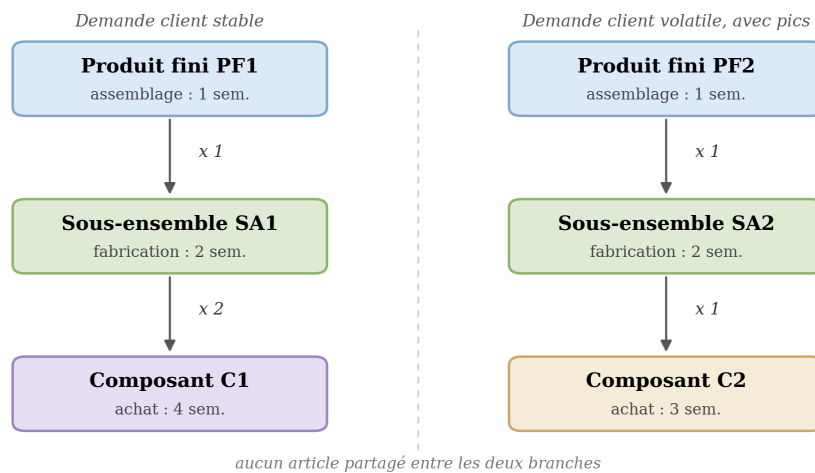
Le contraste avec l'expérience E2 est marqué. Quand PF1 garde ses pics rares, le MRP conserve un avantage de coût jusqu'au niveau le plus fréquent ; quand les deux produits sont frappés à la même fréquence, cet avantage disparaît dès 6 % (62 581 contre 62 674) puis s'inverse : à 12 %, le MRP coûte 14 % de plus que le DDMRP (81 810 contre 71 711), pour un service tombé à 82,7 % contre 99,7 %. La raison rejoint celle de l'Annexe 3 : PF1 est le produit à fort volume et sa protection est la plus mince. Son stock de sécurité de 40 unités absorbe à peine une commande exceptionnelle médiane (30 à 70 unités), et des pics répétés ne lui laissent pas le temps de se reconstituer ; l'amont suit, la consommation du composant critique C1 devenant à la fois plus forte et plus heurtée. Le DDMRP, lui, qualifie les pics des deux produits par sa détection et son buffer C1 mutualisé encaisse la somme des à-coups : son service ne bouge pas. La conclusion de l'expérience E2 s'en trouve renforcée : plus les commandes exceptionnelles touchent une part large du portefeuille, plus vite le MRP perd à la fois le service et le coût.



Taux de service et coût total lorsque PF1 et PF2 subissent des commandes exceptionnelles à la même fréquence, moyennes de vingt réplifications.

Annexe 5 : résultats détaillés des tests de robustesse

Chaque variante modifie une seule hypothèse et rejoue quatre scénarios : l'environnement calme (E1), la référence, la saisonnalité de $\pm 30\%$ (E4) et le stress combiné (E5). Toutes les valeurs sont des moyennes de vingt réplifications, obtenues avec les mêmes graines que dans le corps du mémoire. Les trois variantes de l'hypothèse 4 ne portent que sur des réglages du DDMRP : les valeurs du MRP y sont donc celles de la ligne de référence. La dernière variante remplace la chaîne du mémoire par deux branches indépendantes : PF1 est fait d'un sous-ensemble SA1, lui-même fait de deux C1 achetés en quatre semaines ; PF2 est fait d'un sous-ensemble SA2, lui-même fait d'un C2 acheté en trois semaines. Aucun article n'est partagé, et les deux méthodes y sont recalibrées avec les règles du chapitre 6.



La nomenclature de l'hypothèse 5, avec les délais et les coefficients de lien. Aucun article n'est partagé : chaque produit fini a sa propre branche et son propre composant acheté.

Variante	Scénario	Service MRP	Service DDMRP	Stock MRP	Stock DDMRP	Coût MRP	Coût DDMRP
Résultats du mémoire	Calme (E1)	100,0 %	100,0 %	802	1 491	29 959	52 122
	Référence	90,8 %	99,6 %	1 013	1 906	51 485	60 025
	Saison ± 30 %	76,6 %	98,2 %	1 195	2 365	85 228	67 293
	Stress combiné	67,8 %	98,8 %	1 598	4 396	118 000	91 268
1) Ventes perdues	Calme (E1)	100,0 %	100,0 %	830	1 491	30 247	52 122
	Référence	96,2 %	99,8 %	1 114	1 903	40 783	59 627
	Saison ± 30 %	91,0 %	98,9 %	1 300	2 323	54 328	65 422
	Stress combiné	85,7 %	99,2 %	2 018	4 355	77 932	90 102
2) Coût de rupture $\div 2$	Calme (E1)	100,0 %	100,0 %	802	1 491	29 959	52 122
	Référence	90,8 %	99,6 %	1 013	1 906	40 687	59 544
	Saison ± 30 %	76,6 %	98,2 %	1 195	2 365	57 925	65 215
	Stress combiné	67,8 %	98,8 %	1 598	4 396	75 580	89 726
3) Coût de rupture $\times 2$	Calme (E1)	100,0 %	100,0 %	802	1 491	29 959	52 122
	Référence	90,8 %	99,6 %	1 013	1 906	73 080	60 988
	Saison ± 30 %	76,6 %	98,2 %	1 195	2 365	139 835	71 450
	Stress combiné	67,8 %	98,8 %	1 598	4 396	202 841	94 352
4') Buffers + SA	Calme (E1)	—	100,0 %	—	2 192	—	62 277
	Référence	—	99,6 %	—	3 539	—	81 432
	Saison ± 30 %	—	99,2 %	—	4 176	—	89 776
	Stress combiné	—	98,2 %	—	8 659	—	144 544
4'') Buffers + C3	Calme (E1)	—	100,0 %	—	1 590	—	51 824
	Référence	—	99,7 %	—	2 062	—	58 552
	Saison ± 30 %	—	97,9 %	—	2 407	—	64 898
	Stress combiné	—	97,9 %	—	4 051	—	84 857
4''') Tous les articles bufferisés	Calme (E1)	—	100,0 %	—	2 080	—	52 095
	Référence	—	99,3 %	—	2 596	—	58 891
	Saison ± 30 %	—	98,3 %	—	3 123	—	65 227
	Stress combiné	—	97,3 %	—	4 735	—	85 886
5) Autre nomenclature	Calme (E1)	100,0 %	100,0 %	587	1 402	30 085	46 602
	Référence	95,2 %	99,9 %	740	1 778	41 091	52 807
	Saison ± 30 %	85,4 %	99,6 %	829	2 024	64 099	55 824
	Stress combiné	78,6 %	99,1 %	1 067	3 112	88 253	71 364

Tableau 9 : Résultats complets des cinq tests de robustesse, moyennes de vingt répliques. L'hypothèse 4 ne modifie que les réglages du DDMRP : le MRP y est inchangé et n'est pas rejoué, d'où les tirets.