



UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT

Optimisation conjointe du stock cyclique et du stock de sécurité pour une usine d'assemblage mécanique

Promoteur : Philippe Chevalier

Mémoire-projet présenté par Renaud Courtois

en vue de l'obtention du titre de
Master 120 crédits en Ingénieur de Gestion

Année académique 2015-2016

AVANT-PROPOS

Je tenais sincèrement à remercier :

Mes parents pour leur soutien moral et logistique sans failles.

La société Caterpillar Belgium SA pour m'avoir accueilli pendant près de 4 mois et plus particulièrement mon maître de stage, Philip Wils, pour m'avoir accompagné tout au long du stage, pour sa disponibilité, son dévouement et sa volonté de me transmettre un maximum de connaissances. Je souhaite également remercier Emmanuel Goffaux pour avoir sacrifié de nombreuses heures de travail afin de développer l'outil permettant la mesure et le contrôle de l'inventaire dont nous parlerons dans la seconde partie et pour ses nombreux conseils ainsi que Philippe Michaux pour avoir préparé et encadré ma venue au sein de l'entreprise.

Mon promoteur, Philippe Chevalier, pour ses conseils, sa disponibilité et sa réactivité envers mes sollicitations.

C'est grâce à ces personnes que le stage et la rédaction de ce mémoire ont pu se dérouler correctement jusqu'à leur terme et pour cette raison, je leur en suis profondément reconnaissant.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE 1 : DE LA GESTION DES STOCKS À LA DÉTERMINATION DU STOCK DE SÉCURITÉ	2
INTRODUCTION.....	3
CHAPITRE 1 : LA GESTION DES STOCKS	4
Section 1.1 : Les stocks, une source de coûts	4
1.1.1 Charges liées au bâtiment.....	4
1.1.2 Frais d'assurance.....	5
1.1.3 Frais de personnel.....	5
1.1.4 Dégradation	5
1.1.5 Obsolescence	5
Section 1.2 : Définition.....	6
1.2.1 Le stock cyclique	6
1.2.2 Le stock d'anticipation	6
1.2.3 Le stock de sécurité.....	7
1.2.4 Le stock excédentaire	7
CHAPITRE 2 : DÉTERMINATION ACTUELLE DU STOCK DE SÉCURITÉ.....	8
Section 2.1 : Variabilité de la demande	9
Section 2.2 : Variabilité du temps de réponse.....	10
CHAPITRE 3 : CRITIQUES ET PROPOSITIONS	11
Section 3.1 : Prise en compte de la variabilité de la quantité livrée (QL)	11
Section 3.2 : Les coûts comme critère de décision	12
3.2.1 Coûts d'inventaire (CI)	13
3.2.2 Coûts de non satisfaction de la demande (CNSD)	14
Section 3.3 : Limites de la méthode.....	17
3.3.1 Normalité des distributions	17
3.3.2 Optimisation manuelle impossible	18
CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION	19
Section 4.1 : Fonctionnement de l'outil.....	19
4.1.1 Enregistrement des paramètres	19
4.1.2 Calcul du coût d'achat unitaire	20

4.1.3 Calcul du coût de transport unitaire	21
4.1.4 Détermination du stock de sécurité.....	21
4.1.5 Tableau récapitulatif	22
Section 4.2 : Exemple d'utilisation	24
Section 4.3 : Analyse de sensibilité	26
PARTIE 2 : LE CAS DE CATERPILLAR BELGIUM SA	29
INTRODUCTION.....	30
CHAPITRE 5 : CONTEXTUALISATION	31
Section 5.1 : Présentation de l'entreprise	31
Section 5.2 : Crise de la demande.....	33
Section 5.3 : Description du problème	34
CHAPITRE 6 : DEFINE	35
Section 6.1 : Sérialisation de la marchandise.....	35
Section 6.2 : Système d'information.....	35
6.2.1 Première déduction	37
6.2.2 Deuxième déduction.....	38
Section 6.3 : Pertinence de la comparaison entre usines sœurs.....	38
CHAPITRE 7 : MEASURE	39
Section 7.1 : Valeur globale du <i>pre-POL</i> financier.....	39
Section 7.2 : Composition du <i>pre-POL</i> financier	40
Section 7.3 : Prise en compte des éléments non sérialisés du Pareto.....	41
7.3.1 Illustration du concept de la file d'attente	41
7.3.2 Actualisation du classement des contributeurs du <i>pre-POL</i> financier.....	42
CHAPITRE 8 : ANALYZE.....	43
Section 8.1 : Gestion des stocks.....	43
8.1.1 Prévisions	43
8.1.2 Material Requirement Planning (MRP).....	44
8.1.3 Les planificateurs de matériels (Material planners ou PM)	45
8.1.4 Les composants pull	45
Section 8.2 : Maximisation de la disponibilité	46
Section 8.3 : Pas de prise en compte du coût de transport.....	47
Section 8.4 : Performance de certaines lignes de sous-assemblage	47
Section 8.5 : Longueur de la partie « <i>pre-POL</i> » de la ligne d'assemblage	47
CHAPITRE 9 : IMPROVE.....	48
Section 9.1 : Préambule	48
Section 9.2 : Détermination du stock de sécurité et prise en compte du coût de transport	49

9.2.1 Estimation des paramètres	49
9.2.2 Calcul de la solution optimale.....	50
9.2.3 Compilation des résultats	54
9.2.4 Progressivité de la réduction d'inventaire	55
Section 9.3 : Rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le 22.....	57
Section 9.4 : Transport aérien des composants du fournisseur 33	59
Section 9.5 : Rapatriement des composants du fournisseur 33 vers le 31.....	59
Section 9.6 : Centralisation de la production des composants de la famille 3	60
Section 9.7 : Compression des lignes de sous-assemblage	61
Section 9.9 : Environnement macro-économique	62
CHAPITRE 10 : CONTROL.....	63
Section 10.1 : Actualisation des données	63
Section 10.2 : Suivi des résultats.....	63
10.2.1 Pareto des potentiels de réduction d'inventaire	64
10.2.2 Évolution de l'inventaire	65
CHAPITRE 11 : RÉSULTATS OBTENUS	66
CHAPITRE 12 : OBSTACLES RENCONTRÉS	68
Section 12.1 : Manque de coordination.....	68
12.1.1 Au sein de Caterpillar Belgium.....	68
12.2.1 Entre sociétés sœurs.....	68
Section 12.2 : Accès aux données	69
12.2.1 Vision fragmentée de l'entreprise	69
12.2.2 Multiplicité et désuétude des systèmes d'information	69
CHAPITRE 13 : RECOMMANDATIONS FINALES	71
CONCLUSION GÉNÉRALE	73
BIBLIOGRAPHIE.....	74

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Illustration de l'effet marginal sur les coûts d'une augmentation du niveau de stock de sécurité	13
Figure 3.2 : Illustration de la dépendance du nombre de périodes de danger en fonction de la quantité de commande pour une QC de 10 unités.	15
Figure 3.3 : Comparaison de la distribution de la production journalière de chargeuses sur roues de l'usine de Caterpillar Gosselies pour l'année 2015 et de son équivalent en loi normale.....	17
Figure 4.1 : Capture d'écran des paramètres nécessaires à la détermination conjointe du stock cyclique et du stock de sécurité.....	20
Figure 4.2 : Coût d'achat unitaire en fonction de la quantité de commande et coût de transport unitaire en fonction de la charge en kg.	24
Figure 4.3 : Capture d'écran de l'Excel pour la détermination de la QC combinée des deux types de tôles d'acier	25
Figure 5.1 : Organisation hiérarchique simplifiée du groupe Caterpillar Inc.....	31
Figure 6.1 : Représentation simplifiée de la ligne d'assemblage des chargeuses sur roues	37
Figure 7.1 : Évolution du pre-POL financier de janvier à décembre 2015 avec la valeur du pre-POL financier du dernier jour ouvrable du mois de décembre 2015 comme base 100.	39
Figure 7.2 : Composition du pre-POL financier au 30 mars 2016	40
Figure 7.3 : Illustration du concept de la file d'attente des différents composants en fonction de leur localisation sur la ligne d'assemblage (LA). L'ordre et le nombre de postes représentés ne correspondent pas à la réalité.	41
Figure 10.1 : Classement des composants par potentiel de réduction de valeur	64
Figure 10.2 : Évolution de la valeur d'un composant en comparaison du minimum et du maximum autorisés	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Décomposition du temps de réapprovisionnement	9
Tableau 4.1 : Calcul du coût d'achat unitaire	20
Tableau 4.2 : Calcul du coût de transport unitaire	21
Tableau 4.3 : Détermination du stock de sécurité optimal	22
Tableau 4.4 : Détermination conjointe de la QC et du SS.....	23
Tableau 4.5 : Affichage de la solution optimale	23
Tableau 4.6 : Compilation des données de l'exemple du fabricant de cuves à mazout	24
Tableau 4.7 : Comparaison de l'impact de la variabilité du temps de réapprovisionnement et de la demande sur le stock de sécurité optimal pour les tôles de type 1	27
Tableau 4.8 : Comparaison de l'impact de la variabilité du temps de réapprovisionnement et de la demande sur le stock de sécurité optimal pour les tôles de type 2	27
Tableau 6.1 : Rapport journalier de PPCAR en base 100.....	36
Tableau 7.1 : Valeur des différentes familles de composants sélectionnés pour l'analyse avec comme base 100 la valeur du pre-POL financier de fin décembre 2015	42
Tableau 8.1 : Exemple de fonctionnement d'MRP	44
Tableau 8.2 : Exemple de fonctionnement d'MRP	44
Tableau 9.1 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 11	51
Tableau 9.2 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 21	52
Tableau 9.3 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 31	53
Tableau 9.4 : Comparaison de la situation actuelle et de la situation recommandée. Les coûts de transport ont été ajustés au volume de production de l'année 2015.....	54

Tableau 9.5 : Exemple de réduction progressive de l'inventaire	56
Tableau 9.6 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22.....	57
Tableau 9.7 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22 pour une chute de la demande de XE de l'ordre de 50%	58
Tableau 9.8 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22 pour une chute de la demande de XE de l'ordre de 75%	58
Tableau 9.9 : Évaluation de la rentabilité du transport aérien des composants du fournisseur 33	59
Tableau 9.10 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 33 vers le fournisseur 31.....	59
Tableau 9.11 : Évaluation de la rentabilité de la centralisation de la production des composants de la famille 3 vers le fournisseur 31	60
Tableau 11.1 : Valeur actualisée nette de l'ensemble des recommandations du chapitre 9 ...	66

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BNRTS : *Built Not Ready To Ship*

CA : Coûts d'Achat

CAU : Coût d'Achat Unitaire

CI : Coûts d'Inventaire

CNSD : Coûts de Non Satisfaction de la Demande

CO : Coût d'Opportunité

CSC : Coûts du Stock Cyclique

CSS : Coûts du Stock de Sécurité

CT : Coûts de Transport

CTU : Coût de Transport Unitaire

FL : *Finishing Line*

JO : Jours Ouvrés

MIB : *Minimum Inventory Buffer*

ML : *Main Line*

MOQ : *Minimum Order Quantity*

MRP : *Material Requirement Planning*

MWL : *Medium Wheel Loader*

NS : Niveau de Service

OPACC : *Operationnal Profit After Capital Charges*

PA : *Post Assembly*

PM : Planificateurs de Matériel

PPF : *Pre-Pol* Financier

PPP : *Pre-Pol* Physique

QC : Quantité de Commande

SNB : *Started Not Built*

SS : Stock de Sécurité

TR : Temps de Réapprovisionnement

VAN : Valeur Actualisée Nette

INTRODUCTION GÉNÉRALE

C'est dans le contexte de mon stage de fin d'étude réalisé chez Caterpillar Belgium SA que m'est spontanément venue l'idée d'une méthode de détermination du stock de sécurité. Dans un monde rempli d'incertitude, l'entreprise prônait de manière importante la sécurité et avait tendance à détenir un stock suffisamment important que pour éviter une rupture d'approvisionnement. Ce choix d'un inventaire très important m'a rappelé les propos de Maxime Du camp dans son ouvrage *le Crépuscule*, propos du soir : « *Mieux vaut en avoir trop que pas assez* » (Du Camp, 1898, p. 157). Cette maxime m'a toujours interpellé car entre ces deux extrêmes se trouve en réalité un optimum que l'on doit tenter de trouver. Une des manières de répondre à l'objectif plus large du stage de fin d'étude, à savoir la diminution de l'inventaire, était de déterminer le stock de sécurité adéquat qui constitue selon Sandvig (1998), la portion la plus volumineuse de l'inventaire.

La première partie de ce mémoire traite de la recherche littéraire d'une méthode efficace de la détermination du stock de sécurité. Elle fait tout d'abord l'état des lieux des méthodes existantes pour ensuite proposer une méthode originale permettant de répondre à certaines lacunes de la méthode la plus répandue. Cette nouvelle méthode est accompagnée d'un outil développé sous Excel 2013 permettant d'effectuer les nombreuses opérations de manière automatique. Cet outil était très important pour moi étant donné que je voulais que ma contribution scientifique soit également une contribution professionnelle et qu'elle puisse ainsi être aisément utilisée par les praticiens.

La seconde partie sera le lieu du test de l'efficacité en milieu concret de cette nouvelle méthode. D'autre part, nous présenterons de manière détaillée le projet du stage de fin d'étude ainsi que de son évolution. Celui-ci avait pour objectif plus global de diminuer l'inventaire quelle que soit sa nature. Nous présenterons nos recommandations afin de diminuer cet inventaire que ce soit par l'intermédiaire du calcul du stock de sécurité optimal ou d'autres moyens qui seront présentés ultérieurement. C'est la méthode de gestion de projet très répandue « Six sigma » qui fût une source d'inspiration pour mener le projet de bout en bout tout en gardant une grande marge de manœuvre.

**PARTIE 1 : DE LA GESTION DES STOCKS
À LA DÉTERMINATION DU STOCK DE
SÉCURITÉ**

INTRODUCTION

Cette première partie débute par un développement de l'origine des coûts d'inventaire afin de comprendre la raison pour laquelle l'inventaire est chassé, tant que faire se peut, par les entreprises. Ce chapitre tentera également de définir les différents types de stock selon leur origine.

Dans le second chapitre, nous tenterons de présenter les méthodes actuelles de détermination du stock de sécurité en s'attardant sur la méthode de détermination du stock de sécurité la plus répandue à l'heure actuelle. Nous parlerons également des hypothèses et des lacunes de cette méthode.

Le troisième chapitre parlera des améliorations que l'on pourrait y apporter en proposant une nouvelle méthode de détermination du stock de sécurité mais dont les bases sont identiques. Les lacunes et les limites qui persistent seront également évoquées.

Finalement, le quatrième chapitre présentera le fonctionnement de l'outil pratique qui a été développé ainsi qu'un exemple d'utilisation. Ce sera également l'occasion d'établir une analyse de sensibilité afin d'identifier les paramètres ayant l'influence la plus importante sur le stock de sécurité optimal.

CHAPITRE 1 : LA GESTION DES STOCKS

Section 1.1 : Les stocks, une source de coûts

Longtemps laissée au second plan, la gestion des stocks revêt aujourd'hui une importance capitale. Lorsque le cycle de vie du produit arrive à maturité ou en phase de déclin, les entreprises éprouvent de plus en plus de difficultés à se démarquer de la compétition (Johnson et al, 2011). Dès lors, elles ne se font plus seulement concurrence sur le produit en lui-même mais davantage sur le prix de vente de celui-ci. Elles partent donc à la chasse à la moindre dépense afin d'être capable d'offrir au client un produit meilleur marché que celui du concurrent. Cette chasse aux coûts touche non seulement les charges directes imputables à la production ou à la commercialisation du produit mais également toutes les autres charges supportées par l'entreprise. Les coûts liés à l'inventaire n'échappent pas à cette frénésie.

Les entreprises ont pris conscience du potentiel caché derrière la gestion des stocks. En effet, l'inventaire constitue une immobilisation de capital qui en étant supprimé, pourrait améliorer la position financière de l'entreprise. Deux principaux choix s'offrent à l'entreprise qui liquide ses stocks : rembourser le capital emprunté ou l'investir dans des actifs productifs (Groleau, 2015). Dans les deux cas, cette liquidation permet à l'entreprise de générer plus de profits.

En plus du manque à gagner constitutif à cette immobilisation de capital, un inventaire important peut également engendrer un certain nombre de dépenses supplémentaires toutes proportionnelles à la quantité d'inventaire :

1.1.1 Charges liées au bâtiment

Tout comme l'inventaire, les bâtiments et le matériel indispensables pour entreposer la marchandise constituent une immobilisation de capital. Ces bâtiments nécessitent parfois d'être chauffés, climatisés et éclairés que ce soit pour la conservation du produit, par exemple la nourriture ou les plantes, ou pour les conditions de travail des ouvriers. L'entretien de ceux-ci nécessite des produits consommables (détergents, carburant, électricité) mais également de la main d'œuvre.

1.1.2 Frais d'assurance

La plupart des entreprises ont recours à des assurances qui concernent non seulement le stock mais également le bâtiment. Ces assurances sont proportionnelles à la valeur de l'inventaire en ce qui concerne les assurances du stock et au volume en ce qui concerne les bâtiments. Dans les deux cas, plus la quantité d'inventaire est importante, plus le volume et la valeur seront importants et par conséquent, plus les frais d'assurance seront élevés.

1.1.3 Frais de personnel

Pour un volume de vente constant, la quantité d'inventaire a un impact sur les caristes et magasiniers. En effet, plus l'inventaire est important, plus il occupe un espace important. Les caristes et les magasiniers doivent effectuer des déplacements plus importants, ce qui nuit à leur productivité. Il sera peut-être nécessaire d'engager de nouvelles personnes afin de pallier à cette sous-efficacité.

1.1.4 Dégradation

Un inventaire important implique un taux de rotation faible et par conséquent, un inventaire stocké longtemps avant de disparaître. Durant ce laps de temps, de nombreux produits peuvent se dégrader pour plusieurs raisons : péremption, poussière, rouille, rayons UV. Le risque d'endommager le produit en le heurtant est également plus élevé.

1.1.5 Obsolescence

Qu'elle soit fortuite ou programmée, l'obsolescence touche de nombreux secteurs. Les principaux secteurs touchés par l'obsolescence programmée sont les secteurs électronique et informatique ou encore l'industrie du textile. Il n'est pas rare de constater qu'une nouvelle version sur le marché rende la précédente beaucoup moins attractive, qu'il faudra compenser par une réduction du prix de vente.

Les autres secteurs ne sont pas à l'abri d'un tel problème. En effet, l'émergence de nouvelles lois, principalement en matière de pollution ou de santé, peuvent à tout moment rendre inutilisables certains produits.

Section 1.2 : Définition

L'inventaire représente une accumulation de marchandises en raison d'une asynchronie entre l'approvisionnement en amont et la consommation en aval. L'entreprise peut soit être le fournisseur, soit le consommateur ou encore les deux à la fois pour une même chaîne de valeur. Cette asynchronie peut provenir d'une différence de productivité ou d'un décalage temporel. Ces marchandises peuvent prendre la forme de matières premières, de produits semi-finis ou encore de produits finis. Cette discordance peut avoir plusieurs origines regroupées en quatre catégories : le stock cyclique, le stock d'anticipation, le stock de sécurité et le stock excédentaire.

1.2.1 Le stock cyclique

L'intérêt de commander ou de fabriquer une quantité supérieure au besoin immédiat est de pouvoir bénéficier d'économies d'échelle. La principale source d'économies d'échelle est la présence de coûts fixes ou semi-variables comme le temps de traitement d'une commande, les coûts de transport, le temps de setup. Les coûts semi-variables sont des coûts fixes qui augmentent par palier comme la masse salariale qui est constante pour de légères augmentations de volume de production et puis qui augmente subitement d'un salaire lorsque la charge de travail est trop importante.

Pour la production en grand volume, le phénomène de spécialisation peut apparaître. Plus un travailleur s'adonne à la même tâche, plus il va l'exécuter de manière automatique et rapide. Ces économies d'échelle vont également se répercuter sur le prix de vente du fournisseur.

Le stock cyclique oscille entre 0 et la quantité qui est commandée au fournisseur ou la taille du lot de production.

1.2.2 Le stock d'anticipation

Les machines doivent subir des maintenances, ce qui les rend indisponibles pour une certaine durée. Il est donc nécessaire d'anticiper cette maintenance en prévoyant un stock suffisamment grand que pour passer cette période. Même raisonnement lorsque le fournisseur n'est pas en mesure d'effectuer des livraisons comme lors des congés annuels. Il est également nécessaire de prendre de l'avance lorsque la demande est saisonnière et qu'elle dépasse momentanément la capacité maximale de l'entreprise.

Pour les produits dont la valeur est la plus volatile comme les métaux ou encore les produits pétroliers, un comportement de spéculation pourrait être intéressant afin de profiter de l'aubaine.

1.2.3 Le stock de sécurité

Contrairement au stock d'anticipation, le stock de sécurité a pour but de se prémunir d'un évènement non prévisible. L'entreprise ne dispose d'aucune information quant à un éventuel problème d'approvisionnement ou une hausse de la demande. Elle se tient donc prête au cas où cette probabilité se manifeste.

Si la manifestation de la demande a lieu après le moment où la décision de commander ou de produire est prise, un stock de sécurité est nécessaire car il est possible qu'une demande soudaine apparaisse sans qu'on puisse modifier la commande ou le plan de production. On peut également détenir un stock de sécurité au cas où la demande subirait une hausse persistante, le temps que l'on se donne les moyens de pouvoir s'adapter à cette hausse.

Un problème d'approvisionnement peut se manifester sous deux formes : problème temporel et quantitatif. D'une part, le fournisseur peut avoir un problème de production et envoyer la commande en retard ou le transporteur peut lui aussi avoir du retard. D'autre part, la marchandise peut contenir un défaut de fabrication, elle peut avoir été endommagée durant le transport ou le fournisseur peut simplement s'être trompé dans les quantités.

1.2.4 Le stock excédentaire

Le stock excédentaire reprend l'ensemble des marchandises qui n'ont aucune justification pertinente. Son origine peut à la fois être interne et externe. Elle peut être interne et provenir d'erreurs de production, de commande ou de prévisions. Mais elle peut également être externe et provenir d'une erreur de livraison du fournisseur ou encore d'une demande qui s'est subitement volatilisée. Ce stock doit absolument faire l'objet d'une attention particulière afin de comprendre son origine et d'établir un plan d'action afin de l'éliminer. Le niveau de ce type de stock, dans une situation idéale, devrait se rapprocher de zéro.

C'est donc en définissant correctement son stock cyclique, son stock de sécurité et éventuellement son stock d'anticipation que l'entreprise peut identifier son surplus d'inventaire.

CHAPITRE 2 : DÉTERMINATION ACTUELLE DU STOCK DE SÉCURITÉ

Il existe, aujourd'hui, quelques tentatives d'élaboration de méthodes de détermination du stock de sécurité. Certaines sont grossières et peu fiables, comme la méthode préconisée par Graham (1987) qui fixe son stock de sécurité comme étant égal à la demande pendant la moitié du temps de réapprovisionnement. Par exemple, pour une demande journalière de 10 unités et un temps de réapprovisionnement de 50 jours, le stock de sécurité selon cette méthode est de 250 unités peu importe les caractéristiques de la situation.

La méthode la plus couramment utilisée et notamment décrite par (Bowersox & Closs, 1995), (King, 2011) ou encore (Simchi-Levi et al., 2003) est la méthode basée sur une approche par la loi normale des paramètres statistiques de l'entreprise et qui vise à atteindre un certain niveau de service prédéfini. Cette méthode est suffisamment aboutie que pour être fiable sans être trop difficile à mettre en place, ce qui en fait son grand succès à l'heure actuelle.

Avant de revenir plus en détail sur cette formule, il est nécessaire de faire un petit rappel en ce qui concerne la loi normale.

La loi normale est l'une des lois de probabilité les plus utilisées pour modéliser une variable aléatoire. Sa fonction de densité, c'est-à-dire la probabilité associée à chaque niveau de cette variable, peut s'écrire de la manière suivante :

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (1)$$

En cumulant les valeurs de la fonction de densité, on obtient la fonction de répartition suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2)$$

Cette fonction est intéressante pour la détermination du stock de sécurité car elle permet de déterminer la probabilité de se trouver en deçà ou au-delà d'une certaine valeur de la variable aléatoire qui nous intéresse, c'est-à-dire la demande. On pourra donc, pour chaque valeur du stock de sécurité, déterminer la probabilité de ne pas avoir assez d'inventaire pour satisfaire la demande.

Section 2.1 : Variabilité de la demande

Comme expliqué auparavant, l'idée derrière cette méthode est de sélectionner le stock de sécurité (SS) tel que le niveau de service (NS) que l'on désire atteindre soit respecté. Le niveau de service désigne la portion de la demande que l'on souhaite satisfaire dans l'intervalle de temps convenu avec le client. La formule permettant de respecter ce niveau de service est la suivante :

$$SS = k_{NS} * \sigma_D * \sqrt{\mu_{TR}} \quad (3)$$

Avec :

k_{NS} : Facteur multiplicatif du niveau de service

σ_D : Écart-type de la demande journalière

μ_{TR} : Temps de réapprovisionnement en nombre de jours

C'est le facteur multiplicatif k_{NS} qui permet de faire la relation entre d'une part le niveau de service que l'on souhaite atteindre et d'autre part le stock de sécurité qui y est associé. Afin d'obtenir ce facteur multiplicatif, il suffit de reprendre une table unilatérale de la loi normale comme l'annexe 1 et de trouver le niveau de service se rapprochant le plus de celui que l'on a fixé. Le k_{NS} correspond à la réunion des valeurs de la ligne et de la colonne qui forment l'intersection.

Le temps de réapprovisionnement (TR) comprend l'ensemble du temps qui s'écoule entre le moment où naît la volonté de passer une commande et le moment où cette marchandise est disponible pour le client. Quelques exemples sont repris dans le tableau 2.1 :

Temps de négociation avec le fournisseur
+ Temps de traitement de la commande
+ Temps d'acquisition des matières premières
+ Temps de production du fournisseur
+ Temps du contrôle qualité du fournisseur
+ Temps de transport
+ Temps de contrôle qualité
= Temps de réapprovisionnement

Tableau 2.1 : Décomposition du temps de réapprovisionnement

Prenons l'exemple d'un garagiste qui possède un stock moyen de pneus très important, ce qui l'empêche de pouvoir stocker d'autres éléments importants d'une voiture. Le garagiste est réputé pour la disponibilité de sa marchandise, il désire donc pouvoir satisfaire au minimum 97,5% de ses clients. La demande journalière en pneus suit une loi normale de moyenne 8 et

d'écart-type de 2. Son fournisseur le livre tous les lundis et il travaille 6 jours par semaine. Le niveau de service de 97,5% correspond à un k_{NS} de 1,97. Le stock de sécurité qu'il doit prévoir est donc de :

$$SS = 1,97 * 2 * \sqrt{6} = 9,65$$

Étant donné qu'il n'est pas possible de vendre des parties de pneus, le garagiste doit détenir un stock de sécurité de 10 pneus, ce qui représente un niveau de service d'environ 97,9% si l'on exécute la démarche inverse.

Section 2.2 : Variabilité du temps de réponse

Cependant, ce calcul est incomplet car il n'y a pas que la demande qui peut varier, le temps de réapprovisionnement peut également varier, comme décrit dans la section 1.2.3. Si les deux variabilités sont indépendantes l'une de l'autre, on peut calculer le stock de sécurité comme suit :

$$SS = k_{NS} * \sqrt{\sigma_D^2 * \mu_{TR} + \mu_D^2 * \sigma_{TR}^2} \quad (4)$$

Avec :

k_{NS} : Facteur multiplicatif du niveau de service

σ_D : Écart-type de la demande journalière

μ_{TR} : Moyenne du temps de réapprovisionnement en nombre de jours

μ_D : Moyenne de la demande journalière

σ_{TR} : Écart-type du temps de réapprovisionnement en nombre de jours

Si toutefois les deux variabilités sont dépendantes, ce qui semble néanmoins peu probable, l'équation devient (King, 2011) :

$$SS = k_{NS} * (\sigma_D * \sqrt{\mu_{TR}} + \mu_D * \sigma_{TR}) \quad (5)$$

Reprenons l'exemple du garagiste qui désire déterminer le stock de pneus qu'il doit détenir. Le fournisseur du garagiste a souvent des problèmes de production, ce qui fait que l'écart-type du temps de réapprovisionnement est de 1 jour. Le calcul du stock de sécurité devient :

$$SS = 1,97 * \sqrt{2^2 * 6 + 8^2 * 1^2} = 18,48$$

Le stock de sécurité nécessaire en vue de lui assurer un niveau de service d'au moins 97,5% a considérablement changé, Il est passé de 9,65 à 18,48. Il est donc nécessaire de prendre en compte ce deuxième type de variabilité.

CHAPITRE 3 : CRITIQUES ET PROPOSITIONS

L'objectif de ce chapitre est de répondre à trois des principales lacunes de la méthode expliquée dans le chapitre précédent, à savoir la prise en compte de la variabilité de la quantité livrée, la prise en compte de l'impact du stock de sécurité sur les coûts et de l'influence de la quantité de commande sur la détermination du stock de sécurité optimal. On parlera également de la normalité des distributions de probabilité qui est une hypothèse lourde de sens et qui pourtant n'est pas parfaitement respectée.

Section 3.1 : Prise en compte de la variabilité de la quantité livrée (QL)

Il n'est pas rare que le fournisseur se trompe sur la quantité qui a été commandée, qu'il y ait un défaut de fabrication ou encore que la marchandise soit endommagée durant le transport. Ces événements ont pour conséquence que la marchandise disponible soit en réalité inférieure à celle commandée. Cette variabilité doit être prise en compte lors de la détermination du SS.

Pour cela, il suffit de rajouter la variance de la quantité livrée multipliée par le nombre de livraisons durant le TR. Une nouvelle fois, cela suppose que la demande, le temps de réponse et la quantité livrée soient parfaitement indépendants. En ce qui concerne ces deux derniers, l'indépendance est assez floue. Il est possible que le fournisseur attende de pouvoir constituer un lot complet avant de l'envoyer. La variabilité du temps de réponse sera plus élevée tandis que la variabilité de la quantité livrée sera nulle. Étant donné que leur corrélation serait négative, s'il s'avère bel et bien qu'elles sont corrélées, alors il est admis de l'intégrer au sein de la racine carrée. La formule fournira une légère surestimation du stock de sécurité.

$$SS = k_{NS} * \sqrt{\sigma_D^2 * \mu_{TR} + \mu_D^2 * \sigma_{TR}^2 + \sigma_{QL}^2 * \mu_{TR} * \frac{\mu_D}{QC}} \quad (6)$$

- σ_{QL} : écart-type de la quantité livrée
- QC : Quantité de commande

Herrmann¹ (2011) cité par Becker et al (2013) va même encore plus loin et intègre au sein de la racine carrée le fait que le niveau de l'inventaire peut déjà avoir franchi le point de commande avant qu'une commande soit effectivement passée.

¹ Herrmann, F. (2011). *Operative planung in IT-Systemen für die produktionsplanung und-steuerung*. Heidelberg : Vieweg+Teubner.

Section 3.2 : Les coûts comme critère de décision

Le critère de décision de la détermination du stock de sécurité de la méthode expliquée auparavant est le niveau de service, ce qui sous-entend que le plus important pour l'entreprise est de pouvoir satisfaire le client. Ce raisonnement est vrai pour de nombreuses entreprises du secteur non marchand, pour les hôpitaux ou encore pour les entreprises qui misent beaucoup sur leur image de disponibilité, d'abondance comme le service des pièces de rechange par exemple.

En revanche, ce raisonnement ne tient plus la route pour les entreprises qui ont pour objectif principal de maximiser leurs profits. En effet, bien que le niveau de service soit corrélé positivement aux revenus de l'entreprise, il est également corrélé aux coûts d'inventaire. Cette méthode ne donne aucune indication quant au moment à partir duquel, il n'est plus économique d'augmenter la disponibilité. Il est possible que l'ajout d'une unité en stock de sécurité coûte plus cher que le revenu qui va en découler comme le font remarquer Reynolds & Buffa (1980). En effet, on remarque sur le graphique de la fonction de densité de la loi normale, que la probabilité associée à une valeur éloignée de la moyenne est de plus en plus faible, le revenu marginal à en tirer est donc lui aussi de plus en plus faible. Or, les coûts d'inventaire marginaux sont quant à eux bel et bien constants.

Le dilemme n'est plus de choisir entre un niveau de service élevé et de faibles coûts mais de choisir entre un revenu élevé et des coûts bas. Les deux variables étant de nature monétaire, il est possible de trouver un optimum. Pour ces entreprises, le stock de sécurité optimal est le stock de sécurité qui leur permet de maximiser leurs profits.

Au lieu de considérer les revenus liés à la vente d'un produit, il est également possible de considérer le manque à gagner relatif à un stock insuffisant sous forme de coûts. Cela permettra de prendre en compte les situations dans lesquelles la vente n'est pas perdue, elle est reportée, ce qui engendre un coût supplémentaire pour l'entreprise. L'objectif est donc de minimiser les coûts totaux.

La figure 3.1 illustre ce dilemme. Lorsque le stock de sécurité est de 8 unités, l'ajout d'une unité supplémentaire augmente plus le coût d'inventaire en orange continu qu'il ne diminue les coûts supplémentaires liés à la satisfaction retardée de la demande en pointillés bleus. La courbe grise continue qui reprend la somme de ces deux courbes est donc plus élevée lorsque le stock de sécurité est de 9 par rapport à un stock de sécurité de 8 unités.

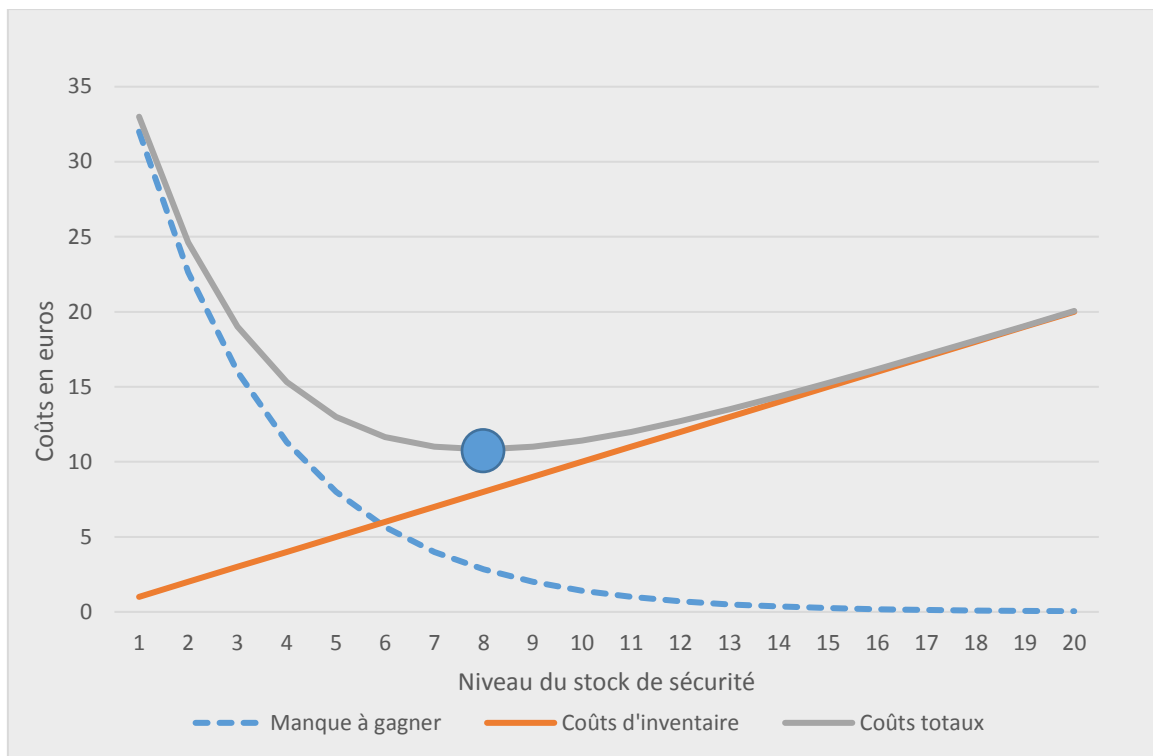


Figure 3.1 : Illustration de l'effet marginal sur les coûts d'une augmentation du niveau de stock de sécurité

3.2.1 Coûts d'inventaire (CI)

Les coûts d'inventaire peuvent aisément être obtenus en multipliant la quantité d'inventaire (SS) par son coût unitaire ($\alpha \cdot V$). Le paramètre (α) comprend les coûts d'assurance, le coût d'opportunité du capital mais également les autres types de coûts relevés dans la section 1.1 en pourcentage de la valeur de l'inventaire qui est souvent fixée à la valeur d'acquisition. Ce paramètre est difficile à déterminer mais il peut néanmoins être grossièrement estimé en empilant les différents coûts dont on a parlé précédemment.

$$CI_{SS} = \alpha \cdot V \cdot SS \quad (7)$$

α = coût d'inventaire par unité de valeur

V = valeur unitaire du composant

SS : stock de sécurité en unités

L'hypothèse sous-jacente est que les coûts d'inventaire sont proportionnels à la valeur du stock de sécurité, ce qui semble être le cas pour les deux composantes les plus importantes à savoir le coût d'opportunité du capital et les coûts d'assurance.

3.2.2 Coûts de non satisfaction de la demande (CNSD)

Les coûts de non satisfaction de la demande correspondent au manque à gagner constitutif à un inventaire insuffisant. Pour cela, il faut déterminer le coût d'opportunité de cette demande non satisfaite. Il peut correspondre au manque à gagner d'une vente perdue s'il s'avère que la demande est définitivement perdue ou il peut s'agir de coûts fixes irrécupérables subits à ce moment-là ou encore des coûts additionnels pour satisfaire la demande dans le futur.

Son équation est la suivante :

$$CNSD_{SS} : \sum_{d=\mu_{DP}}^{+\infty} \left[\frac{e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{d - \mu_{DP}}{\sigma_u} \right)^2}}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} * (d - \mu_{DP} - SS) \right] * CO * NP \quad (8)$$

Avec :

d : Valeur que peut prendre la demande

μ_{DP} : Moyenne de la demande par période

σ_u : Écart-type unifié

SS : Stock de sécurité en unités

CO : Coût d'opportunité d'une demande non satisfaite

NP : Nombre de périodes par an

Les CNSD sont obtenus en multipliant l'espérance de la demande insatisfaite par période par son coût d'opportunité (CO) et par le nombre de périodes par an (NP).

La portion de la demande qui n'a pas pu être satisfaite durant la période est quant à elle

obtenue en multipliant la probabilité d'occurrence de chaque valeur possible $\left(\frac{e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{d - \mu_{DP}}{\sigma_u} \right)^2}}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \right)$ par l'écart de cette valeur avec la quantité d'inventaire disponible $((d - \mu_{DP} - SS))$, c'est-à-dire l'écart avec le stock cyclique et le stock de sécurité. Ensuite, il faut faire la somme de cette multiplication pour chaque valeur possible de la demande.

L'écart-type que l'on va considérer dans cette formule (σ_u), correspond au paramètre que l'on multipliait auparavant par le facteur multiplicatif, à savoir :

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_D^2 * P + \mu_D^2 * \sigma_{TR}^2 + \sigma_{QL}^2 * P * \frac{\mu_D}{QC}} \quad (9)$$

P correspond à la longueur d'une période en nombre de jours tandis que $P * \frac{\mu_D}{QC}$ correspond au nombre de réapprovisionnements pendant une période.

La période à considérer est naturellement le TR étant donné que c'est durant ce laps de temps que l'on ne peut modifier la commande et que l'on se retrouve en danger. Le μ_{DP} peut donc être remplacé au sein de l'équation (8) par la demande durant le TR, à savoir $\mu_D * \mu_{TR}$. Le P de l'équation (9) peut également être remplacé par le TR : μ_{TR} et le nombre de réapprovisionnement durant le TR ($P * \frac{\mu_D}{QC}$) devient $\frac{\mu_D * \mu_{TR}}{QC}$.

Le NP de l'équation (8) correspond quant à lui au nombre de fois où l'on va se trouver en danger durant un an. Cette fréquence ne dépend pas du TR, elle dépend directement de la QC comme le font remarquer (Bowersox & Closs, 1995), (Graves, 1987) ou encore (Natarajan & Goyal, 1994). En effet, plus la QC est importante, plus la fréquence de commande sera faible et par conséquent, plus la fréquence d'un stock qui s'amenuise sera faible.

Comme on peut le constater dans la figure 3.2, il n'y a que 2 périodes de danger étant donné qu'il n'y a que deux réapprovisionnements par an. Ce n'est que durant les 5 derniers jours des deux périodes qu'aucune commande ne peut être passée afin de rectifier le tir. Le nombre de périodes annuelles de l'équation (8) peut donc se réécrire $\frac{JO * \mu_D}{QC}$ avec JO correspondant au nombre de jours ouvrés par an. Les CNSD et l'écart-type unifié se réécrivent comme suit :

$$CNSD_{SS} : \sum_{x=\mu_D * \mu_{TR}}^{+\infty} \left[\frac{e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{d - \mu_D * \mu_{TR}}{\sigma_u} \right)^2}}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} * (d - \mu_D * \mu_{TR} - SS) \right] * CO * \frac{JO}{QC} * \mu_D \quad (10)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_D^2 * \mu_{TR} + \mu_D^2 * \sigma_{TR}^2 + \sigma_{QL}^2 * \frac{\mu_D * \mu_{TR}}{QC}} \quad (11)$$

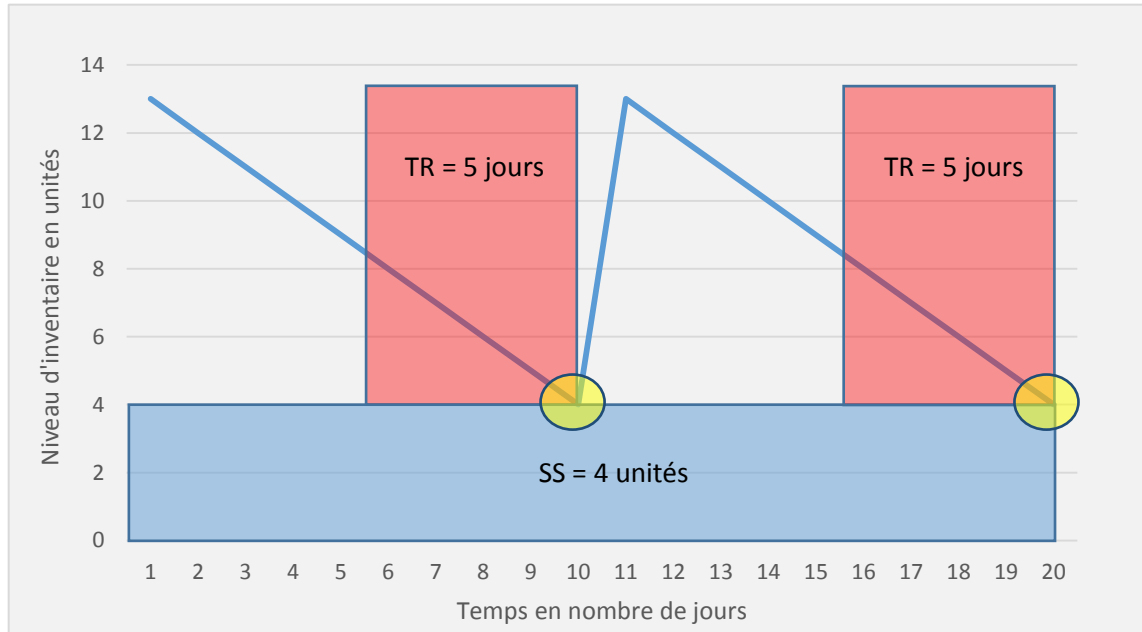


Figure 3.2 : Illustration de la dépendance du nombre de périodes de danger en fonction de la quantité de commande pour une QC de 10 unités.

Étant donné que le stock de sécurité varie en fonction de la QC, la variable pivot, c'est-à-dire la variable permettant de minimiser les coûts totaux, n'est plus le SS mais bien la QC. En effet, choisir le SS minimisant les coûts totaux revient à choisir la QC minimisant les coûts totaux. Cela ouvre la possibilité d'inclure au sein de l'équation de minimisation les coûts de transport qui eux aussi dépendent directement de la quantité de commande ainsi que les coûts d'achat sans oublier les coûts du stock cyclique. En effet, l'entreprise peut bénéficier de réductions pour des achats en grande quantité.

L'équation de minimisation des coûts devient :

$$\text{Coûts totaux} = CA_{QC} + CT_{QC} + CSC_{QC} + CSS_{QC} + CNSD_{QC} \quad (12)$$

Avec :

Variables

$CA_{QC} = A_{QC} * JO * \mu_D$: coûts d'achat

$CT_{QC} = T_{QC} * \frac{JO * \mu_D}{QC}$: coûts de transport

$CSC_{QC} = \frac{QC - \mu_D}{2} * \alpha * V$: coûts du stock cyclique

$CSS_{QC} = SS_{QC} * \alpha * V$: coûts du stock de sécurité

$CNSD_{QC} = \sum_{d=\mu_D * \mu_{TR}}^{\infty} \left[\frac{e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{d - \mu_D * \mu_{TR}}{\sigma_u} \right)^2}}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} * (d - \mu_D * \mu_{TR} - SS_{QC}) \right] * CO * \frac{JO * \mu_D}{QC}$: coûts de non satisfaction de la demande

QC = quantité de commande

Paramètres

A_{QC} = coût d'achat unitaire en fonction de la quantité commandée

JO = quantité de jours ouvrés annuels

μ_D = demande journalière moyenne

T_{QC} = coût d'un voyage en fonction de la charge admise

α = coût de l'inventaire par unité de valeur

V = valeur unitaire du composant

SS_{QC} = stock de sécurité optimal en fonction de la quantité commandée

d = valeur que peut prendre la demande

μ_{TR} = temps de réapprovisionnement moyen

Section 3.3 : Limites de la méthode

3.3.1 Normalité des distributions

La méthode de détermination du stock de sécurité qui a été mise au point se base sur une hypothèse majeure dont l'influence sur la solution optimale peut être assez importante. Le calcul suppose notamment une normalité de la distribution de la demande en aval et de la quantité livrée en amont. Admettons que la demande oscille uniformément entre 0 et 10 unités par jour avec une moyenne de 5 et un écart-type de 2,88. Une approximation de cette distribution par une loi normale donnerait une probabilité de 4,1% d'avoir une demande supérieure à 10 alors qu'elle est en réalité nulle. Le calcul peut donc fournir un stock de sécurité optimal supérieur à ce qu'il devrait être.

Il apparaît tout de même, sur base de l'historique de la production des chargeuses sur roues de l'usine de Caterpillar Gosselies que la distribution de la demande se rapproche davantage d'une loi normale que d'une distribution uniforme. La figure 3.3 compare la distribution de la production journalière de chargeuses sur roues en orange continu et la distribution normale comportant le même écart-type en pointillé bleu. On peut observer que les courbes sont similaires bien que la distribution de la production de chargeuses sur roues semble légèrement pencher vers la droite.

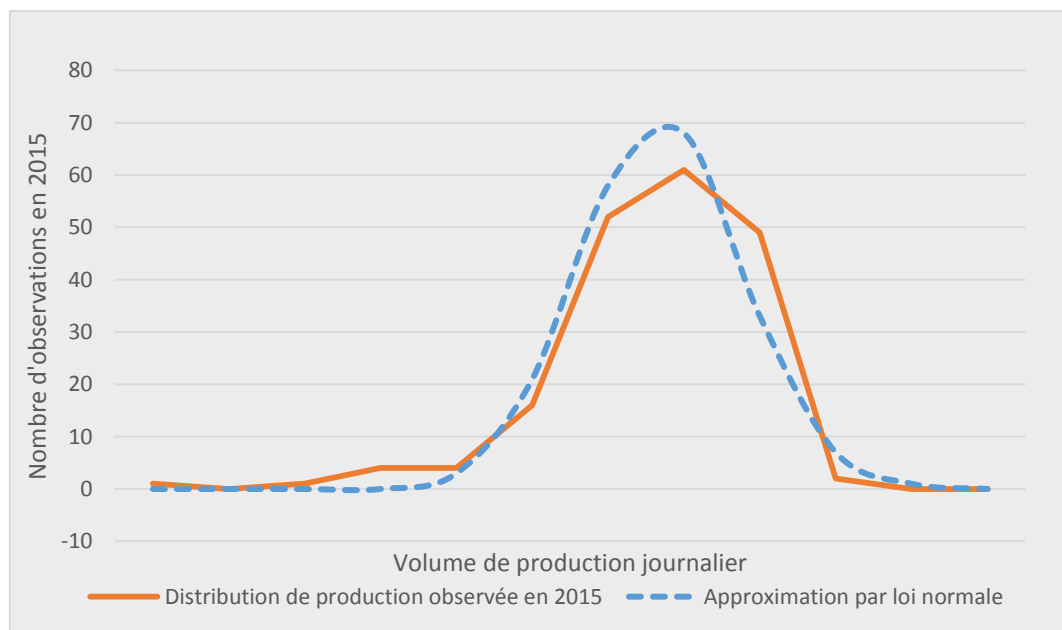


Figure 3.3 : Comparaison de la distribution de la production journalière de chargeuses sur roues de l'usine de Caterpillar Gosselies pour l'année 2015 et de son équivalent en loi normale

Les valeurs de l'axe des abscisses ont volontairement été supprimées pour des raisons de confidentialité. L'axe des ordonnées, quant à lui, reprend la fréquence d'observation de ces productions journalières pour l'année 2015.

En dépit d'être parfait, le modèle est néanmoins utile. Il n'existe à l'heure actuelle aucune autre méthode permettant de calculer le stock de sécurité avec plus de précision. Aujourd'hui, les entreprises marchandes peuvent se baser sur des données plus factuelles (variabilité de la demande et du fournisseur, coût d'opportunité) pour déterminer le stock de sécurité adéquat qui se faisait encore pour certaines d'entre elles, complètement au feeling, à défaut de pouvoir utiliser l'aspect économique de la précédente méthode.

3.3.2 Optimisation manuelle impossible

La deuxième limite de la méthode présentée réside dans sa difficulté à déterminer l'optimalité de manière manuelle, ce qui constituait l'un des points forts de la méthode précédente. En effet, la somme présente dans le calcul du coût de non satisfaction de la demande ne permet pas de déterminer la dérivée seconde de manière manuelle afin d'identifier l'optimum, il est nécessaire d'avoir recours à des algorithmes. C'est pourquoi, j'ai trouvé intéressant d'utiliser le tableur Microsoft Excel 2013 afin d'effectuer les calculs nécessaires et de rendre l'outil accessible à tous. Étant donné l'infinité des solutions possibles, nous nous limiterons aux 100 premières quantités de commande supérieures à la demande journalière, aux 200 premières valeurs que peut prendre la demande entre deux commandes ainsi qu'un stock de sécurité maximal de 200 unités. Cela sous-entend que l'outil pourrait ne pas fonctionner correctement pour des valeurs d'écart-type supérieures à 50. Le nombre d'opérations (un peu plus de 4 000 000) est suffisamment peu important pour que la solution optimale soit calculée dans un temps raisonnable de l'ordre de quelques secondes avec un tableur.

Si cela ne suffit pas pour déterminer la solution optimale, alors il est possible de débiter le calcul de la QC ou du SS à une valeur supérieure à la demande journalière, ce qui augmente les possibilités.

Le prochain chapitre va tenter de mettre au point un outil permettant de calculer les coûts totaux des possibilités dont nous venons de parler et de déterminer parmi elles, quelle est la combinaison QC-SS qui mène aux coûts totaux les plus faibles.

CHAPITRE 4 : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

Section 4.1 : Fonctionnement de l'outil

4.1.1 Enregistrement des paramètres

La première étape consiste bien évidemment à remplir les cases jaunes qui reprennent l'intégralité des informations nécessaires à la détermination conjointe de la quantité de commande et du stock de sécurité. Sur la figure 4.1, Il y a trois tableaux à remplir : un tableau reprenant le coût de transport unitaire (CTU) associé au poids du chargement. Il est également possible de faire la même chose si les coûts de transport dépendent plutôt du volume, il suffit simplement d'adapter une formule. Un second tableau reprend le coût d'achat unitaire (CAU) associé à chaque quantité de commande. Le dernier tableau compile l'ensemble des autres paramètres dont voici les nouveaux :

P_P = poids du packaging

L_P = longueur du packaging

l_P = largeur du packaging

CM_P = capacité maximale du packaging

P_C = poids du composant seul

L_{MT} = longueur du moyen de transport

l_{MT} = largeur du moyen de transport

CM_P correspond à la capacité maximale du packaging qui contient la marchandise. Par exemple, $CM_P = 4$ s'il est possible de mettre jusqu'à quatre chaises sur une palette dont les dimensions sont $L_P * l_P$. Le calculateur saura que le poids d'une commande de 3 chaises correspond au poids d'une seule palette plus le poids de trois chaises. Ce paramètre peut également être utilisé lorsque la marchandise peut être empilée. Alors, sa valeur correspondra au nombre maximal de pièces que l'on peut empiler les unes sur les autres.

À l'issue du remplissage des paramètres, la capacité maximale du transport (CM_T) va être calculée sur base de la capacité maximale en volume (CMV_T) et en poids (CMP_T) qui sont-elles même calculées sur base des dimensions et du poids du packaging et du composant. Il est toujours possible d'inscrire manuellement la capacité maximale en volume si le packaging n'est pas tout à fait rectangulaire.

Charge	CTU	QC	CAU	α	10%
1000	€ 300	50	€ 225	V	€ 225
2000	€ 556	100	€ 200	CO	€ 50
3000	€ 792	200	€ 200	JO	225
4000	€ 1.028	300	€ 198	μ_D	10
5000	€ 1.180	400	€ 197	σ_D	3,16
6000	€ 1.352	500	€ 196	μ_{TR}	60
7000	€ 2.082			σ_{TR}	4
8000	€ 2.222			σ_{QL}	5%
9000	€ 2.362			P_P	50
10000	€ 2.501			L_P	520
11000	€ 2.641			l_P	220
12000	€ 2.780			CM_P	40
13000	€ 2.920			P_C	264
14000	€ 3.060			L_{MT}	1200
15000	€ 3.199			l_{MT}	235
16000	€ 3.339			CM_{P_T}	67
17000	€ 3.478			CM_{V_T}	80
18000	€ 3.618			CM_T	67

Figure 4.1 : Capture d'écran des paramètres nécessaires à la détermination conjointe du stock cyclique et du stock de sécurité

4.1.2 Calcul du coût d'achat unitaire

Le calculateur va simplement reprendre le coût d'achat unitaire correspondant à la bonne quantité de commande dans le deuxième tableau de la figure 4.1. Étant donné que la fonction « Si » d'Excel est limitée à 8 boucles, il est nécessaire d'ajouter une colonne toutes les 8 valeurs

QC	Coût d'achat				
	1-8	9-16	17-24	25-32	33-40
40	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
41	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
42	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
43	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
44	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
45	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
46	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
47	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
48	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
49	€ 225	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
50	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
51	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
52	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
53	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
54	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
55	€ 200	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0

Tableau 4.1 : Calcul du coût d'achat unitaire

4.1.3 Calcul du coût de transport unitaire

Tout d'abord, sur base de la capacité maximale du transport, le calculateur va déterminer le nombre de navettes qui correspond à la quantité de commande. Il va également calculer le poids total de la commande, ce qui lui permet de déterminer le poids moyen par navette en émettant l'hypothèse que le poids est également réparti entre toutes les navettes. Finalement, c'est le même principe que pour le coût d'achat unitaire, sur base du poids du chargement, il va rechercher le coût de transport unitaire dans le premier tableau de la figure 4.1.

QC	Coût de transport							
	# nav	Poids tot	Poids/nav	1-8	9-16	17-24	25-32	33-40
40	1	10610	10610	€ 2.641	€ 2.641	€ 3.478	€ 0	€ 0
41	1	10924	10924	€ 2.641	€ 2.641	€ 3.478	€ 0	€ 0
42	1	11188	11188	€ 2.780	€ 2.780	€ 3.478	€ 0	€ 0
43	1	11452	11452	€ 2.780	€ 2.780	€ 3.478	€ 0	€ 0
44	1	11716	11716	€ 2.780	€ 2.780	€ 3.478	€ 0	€ 0
45	1	11980	11980	€ 2.780	€ 2.780	€ 3.478	€ 0	€ 0
46	1	12244	12244	€ 2.920	€ 2.920	€ 3.478	€ 0	€ 0
47	1	12508	12508	€ 2.920	€ 2.920	€ 3.478	€ 0	€ 0
48	1	12772	12772	€ 2.920	€ 2.920	€ 3.478	€ 0	€ 0
49	1	13036	13036	€ 3.060	€ 3.060	€ 3.478	€ 0	€ 0
50	1	13300	13300	€ 3.060	€ 3.060	€ 3.478	€ 0	€ 0
51	1	13564	13564	€ 3.060	€ 3.060	€ 3.478	€ 0	€ 0
52	1	13828	13828	€ 3.060	€ 3.060	€ 3.478	€ 0	€ 0
53	1	14092	14092	€ 3.199	€ 3.199	€ 3.478	€ 0	€ 0
54	1	14356	14356	€ 3.199	€ 3.199	€ 3.478	€ 0	€ 0
55	1	14620	14620	€ 3.199	€ 3.199	€ 3.478	€ 0	€ 0
56	1	14884	14884	€ 3.199	€ 3.199	€ 3.478	€ 0	€ 0
57	1	15148	15148	€ 3.339	€ 3.339	€ 3.478	€ 0	€ 0
58	1	15412	15412	€ 3.339	€ 3.339	€ 3.478	€ 0	€ 0

Tableau 4.2 : Calcul du coût de transport unitaire

4.1.4 Détermination du stock de sécurité

Le tableau 4.3 reprend un exemple abrégé du tableau de détermination du stock de sécurité. En effet, le tableau utilisé dans l'Excel fait environ 200 colonnes et 200 lignes.

Chaque valeur de la première colonne reprend une valeur que peut prendre la demande durant le temps de réapprovisionnement. Étant donné que ce qui nous intéresse c'est lorsque la demande est supérieure au stock cyclique, la première valeur correspond à la demande moyenne durant le TR. Chaque colonne de la toute première ligne reprend différentes valeurs de stock de sécurité en commençant par 0, c'est-à-dire aucun stock de sécurité.

Pour chaque combinaison de la valeur de la demande et du niveau de stock de sécurité, le calculateur va déterminer les coûts de non satisfaction de la demande qui y sont associés.

Ensuite, pour chaque niveau de stock de sécurité, la somme de l'ensemble des CNSD associés aux différentes valeurs de la demande va être réalisée à laquelle vont être ajoutés les coûts du stock de sécurité (CSS) pour obtenir les coûts totaux (Total).

Finalement, la valeur minimale des coûts totaux sera sélectionnée (31€) avec le stock de sécurité (4) et le niveau de service (88,53%) associés.

		Niveau du stock de sécurité									
QC = 1		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Niveau de la demande	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	23	12	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	23	16	8	0	0	0	0	0	0	0
	5	18	13	9	4	0	0	0	0	0	0
	6	11	9	6	4	2	0	0	0	0	0
	7	5	4	4	3	2	1	0	0	0	0
	8	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0
	9	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CNSD		€ 98	€ 56	€ 29	€ 13	€ 5	€ 2	€ 1	€ 0	€ 0	€ 0
CSS		€ 0	€ 7	€ 13	€ 20	€ 26	€ 33	€ 39	€ 46	€ 52	€ 59
Total		€ 98	€ 63	€ 42	€ 33	€ 31	€ 34	€ 40	€ 46	€ 52	€ 59
NS		50,00%	61,81%	72,61%	81,63%	88,53%	93,35%	96,43%	98,23%	99,19%	99,66%

Tableau 4.3 : Détermination du stock de sécurité optimal

Il existe 100 tableaux comme celui-ci dans l'Excel afin de calculer le stock de sécurité optimal pour chaque niveau de la quantité de commande.

Il est à noter que si la demande ne suit pas une distribution normale, alors il suffit d'ajouter une colonne « Probabilité » entre « Niveau de la demande » et les valeurs possibles de la demande avec la probabilité associée à chaque valeur de la demande afin de calculer l'espérance de la demande non satisfaite et par conséquent les CNSD en tenant compte de cette distribution particulière.

4.1.5 Tableau récapitulatif

Le tableau 4.4 reprend les différents composants du coût total. Les coûts d'achat (CA) sont obtenus en multipliant le coût d'achat unitaire par le volume de production annuel.

Les coûts de transport (CT) sont obtenus en multipliant le coût de transport unitaire par le nombre de navettes nécessaires par année.

Les coûts du stock cyclique (CSC) sont obtenus en multipliant le stock cyclique moyen par sa valeur unitaire et le coefficient de valeur. Le stock cyclique moyen est quant à lui obtenu en soustrayant la demande journalière de la QC et en divisant le tout par 2.

Le coût du stock de sécurité et les coûts de non satisfaction de la demande ont déjà été calculés dans le tableau 4.3, ils sont simplement repris tels quels.

Finalement, le total de ces différents types de coûts est effectué et la solution optimale en jaune correspond à la solution menant aux coûts totaux les plus faibles. Il est également possible de se rendre compte de l'écart des différentes possibilités avec la solution optimale si jamais l'entreprise était dans l'obligation de temporairement dévier.

QC	CA	CT	CSC	CSS	CNSD	TOTAL	
60	€ 450.000	€ 125.207	€ 0	€ 2.430	€ 369	€ 578.006	101%
61	€ 450.000	€ 128.303	€ 11	€ 2.430	€ 364	€ 581.109	101%
62	€ 450.000	€ 126.234	€ 23	€ 2.408	€ 381	€ 579.045	101%
63	€ 450.000	€ 124.230	€ 34	€ 2.408	€ 376	€ 577.048	100%
64	€ 450.000	€ 122.289	€ 45	€ 2.408	€ 371	€ 575.113	100%
65	€ 450.000	€ 125.240	€ 56	€ 2.408	€ 366	€ 578.070	101%
66	€ 450.000	€ 123.342	€ 68	€ 2.385	€ 384	€ 576.179	100%
67	€ 450.000	€ 121.501	€ 79	€ 2.385	€ 379	€ 574.345	100%
68	€ 450.000	€ 165.523	€ 90	€ 2.385	€ 375	€ 618.373	108%
69	€ 450.000	€ 163.124	€ 101	€ 2.385	€ 370	€ 615.981	107%
70	€ 450.000	€ 160.794	€ 113	€ 2.363	€ 388	€ 613.657	107%
71	€ 450.000	€ 158.529	€ 124	€ 2.363	€ 384	€ 611.399	106%
72	€ 450.000	€ 156.327	€ 135	€ 2.363	€ 379	€ 609.204	106%
73	€ 450.000	€ 154.186	€ 146	€ 2.363	€ 375	€ 607.069	106%
74	€ 450.000	€ 152.102	€ 158	€ 2.363	€ 371	€ 604.993	105%
75	€ 450.000	€ 158.450	€ 169	€ 2.340	€ 389	€ 611.348	106%
76	€ 450.000	€ 156.366	€ 180	€ 2.340	€ 384	€ 609.270	106%
77	€ 450.000	€ 154.335	€ 191	€ 2.340	€ 380	€ 607.246	106%
78	€ 450.000	€ 152.356	€ 203	€ 2.340	€ 376	€ 605.275	105%
79	€ 450.000	€ 150.428	€ 214	€ 2.318	€ 395	€ 603.354	105%
80	€ 450.000	€ 148.547	€ 225	€ 2.318	€ 391	€ 601.481	105%

Tableau 4.4 : Détermination conjointe de la QC et du SS

Un autre petit tableau reprend cette fois-ci la combinaison QC-SS optimale, le niveau de service et les coûts totaux qui y sont associés.

QC OPT	67
SS OPT	106
NS OPT	98,646%
CT OPT	€ 574.345

Tableau 4.5 : Affichage de la solution optimale

Section 4.2 : Exemple d'utilisation

Prenons l'exemple d'un fabricant de cuves à mazout qui se fournit en tôles d'acier en Chine. Le temps de fabrication et le transport par bateau de ces tôles prennent 60 jours ouvrables avec un écart-type de 4 jours. Celui-ci fabrique deux types de cuves à mazout : aériennes et enterrées.

Il a besoin pour cela de deux types de tôles, une tôle d'une épaisseur de 3mm et non traitée pour les cuves aériennes et une tôle traitée d'une épaisseur de 4mm pour les cuves enterrées. La demande du premier type est de 7 unités par jour avec un écart-type de 3 tandis que la demande du second type est de 3 unités par jour avec un écart-type de 1.

Chaque tôle d'acier lui permet de fabriquer une cuve à mazout, les plans des découpes se trouvent aux annexes 2 et 3. Le packaging qui contient ces tôles est identique, il mesure 5 mètres 20 de long, 2 mètres 20 de large et 1 mètre 50 de hauteur. Il peut contenir jusqu'à 40 tôles. Les dimensions du conteneur sont de 12m par 2,35m.

Chaque retard de production le force à travailler un week-end ce qui lui revient à 50€ de main-d'œuvre supplémentaire par cuve. Le premier type de tôle coûte 200€ tandis que le second coûte 250€. Environ 5% des tôles réceptionnées font défaut soit parce qu'elles ne correspondent pas à ce qui a été commandé ou soit parce qu'elles comportent des défauts de fabrication.

Toutes les informations présentées ainsi que les coûts d'achat et de transport sont respectivement rassemblés dans le tableau 4.6 et la figure 4.2 :

	μ_D	σ_D	V	μ_{TR}	σ_{TR}	σ_{QL}	Poids	Dimensions P	Lot	Dimensions T
Type 1	7	3	200	60	4	5%	240	520 220	40	1200 235
Type 2	3	1	250				320			

Tableau 4.6 : Compilation des données de l'exemple du fabricant de cuves à mazout

Charge	CTU	QC	CAU
1000	€ 300	50	€ 225
2000	€ 556	100	€ 200
3000	€ 792	200	€ 200
4000	€ 1.028	300	€ 198
5000	€ 1.180	400	€ 197
6000	€ 1.352	500	€ 196
7000	€ 2.082		
8000	€ 2.222		
9000	€ 2.362		
10000	€ 2.501		
11000	€ 2.641		
12000	€ 2.780		
13000	€ 2.920		
14000	€ 3.060		
15000	€ 3.199		
16000	€ 3.339		
17000	€ 3.478		
18000	€ 3.618		

Figure 4.2 : Coût d'achat unitaire en fonction de la quantité de commande et coût de transport unitaire en fonction de la charge en kg.

Étant donné que les deux types de tôles proviennent du même fournisseur, il est nécessaire de consolider les commandes afin de minimiser les coûts de transport. Cela nécessite une manipulation supplémentaire afin que l'on puisse utiliser le logiciel.

Nous allons utiliser le progiciel comme s'il n'y avait qu'un seul type d'acier afin de connaître la quantité de commande optimale. Ensuite, il suffira de compléter séparément les données pour chaque type de tôle et sélectionner le stock de sécurité optimal en fonction de la quantité de commande optimale.

La demande correspond à la somme des deux demandes, à savoir 10 tôles par jour et l'écart-type correspond à la racine carrée de la somme des écarts-types, à savoir $\sqrt{10}$. Nous savons que 70% des tôles sont de type 1 et 30% de type 2, nous avons donc une masse pondérée de 264 kg et une valeur pondérée de 215€.

Après avoir rempli ces données dans le logiciel, la quantité de commande optimale combinée est, comme nous pouvons le voir dans la figure 4.3, de 67 unités soit environ 47 tôles du premier type et 20 tôles du second type. Nous allons à présent remplir les données séparément pour chaque type de tôle et nous allons conserver le SS optimal correspondant à une QC respectivement de 47 et 20 unités pour les tôles de type 1 et de type 2, ce qui donne un SS de respectivement 84 et 32 unités. Les deux captures d'écran se trouvent à l'annexe 4.

FILEHOMEINSERTPAGE LAYOUTFORMULASDATAREVIEWVIEW

Cut

Copy

Format Painter

Clipboard

Calibri

11

A⁺A⁻

B

I

U

Font

Alignment

General

Number

Conditional Formatting

Format as Table

Normal

Good

Styles

K28

<

Figure 4.3 : Capture d'écran de l'Excel pour la détermination de la QC combinée des deux types de tôles d'acier

Section 4.3 : Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité peut s'avérer très instructive car elle permet de déterminer quelles variables ont le plus d'impact sur le stock de sécurité. Dès lors, on pourra fixer des priorités afin de s'attarder en premier lieu sur les variables qui ont le plus d'impact sur la solution optimale.

Reprenons la formule de l'écart-type unifié (11) :

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_D^2 * \mu_{TR} + \mu_D^2 * \sigma_{TR}^2 + \sigma_{QL}^2 * \frac{\mu_D * \mu_{TR}}{QC}}$$

Découpons cet écart-type unifié en trois parties et remplaçons chaque sous écart-type par k, nous obtenons :

$$\sigma_D : k * \mu_{TR}$$

$$\sigma_{TR} : k * \mu_D^2$$

$$\sigma_{QL} : k * \frac{\mu_D * \mu_{TR}}{QC}$$

Nous pouvons affirmer que la variabilité de la demande a un impact au moins aussi important que la variabilité de la quantité livrée étant donné que dans le second cas, le facteur multiplicatif comprend QC en plus au dénominateur et que QC ne peut être inférieur à μ_D .

En revanche, en ce qui concerne l'impact de la variabilité du TR, il peut être à la fois inférieur ou supérieur à l'impact de la variabilité de la demande, cela dépend de la valeur des paramètres.

Par exemple, pour les deux types de tôles on a :

$$\text{Type 1 : } \mu_{TR} = 60 \quad \text{qui est légèrement supérieur à} \quad \mu_D^2 = 7^2 = 49$$

$$\text{Type 2 : } \mu_{TR} = 60 \quad \text{qui est largement supérieur à} \quad \mu_D^2 = 3^2 = 9$$

Dans les deux cas, la variabilité de la demande a plus d'impact que la variabilité du TR. Toutefois, nous pouvons observer que pour le second type de tôle cet impact est beaucoup plus important.

Voici un tableau qui compare directement l'impact de ces deux types de variabilités sur le stock de sécurité des tôles de type 1 lorsque la quantité de commande est de 47 :

		Écart-type du TR σ_{TR}								
		3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
σ_D	2	54	58	61	65	68	72	76	80	83
	2,25	56	59	63	66	70	73	77	81	84
	2,5	58	61	64	68	71	75	78	82	86
	2,75	59	63	66	69	73	76	80	83	87
	3	62	65	68	71	74	78	81	85	88
	3,25	64	67	70	73	76	79	83	86	90
	3,5	66	69	72	75	78	81	85	88	91
	3,75	68	71	74	77	80	83	86	90	93
	4	71	73	76	79	82	85	88	91	95

Tableau 4.7 : Comparaison de l'impact de la variabilité du temps de réapprovisionnement et de la demande sur le stock de sécurité optimal pour les tôles de type 1

Selon nos calculs préliminaires, la variabilité de la demande devait avoir un impact légèrement plus important que la variabilité du TR en ce qui concerne les tôles de type 1. En effet, considérons comme point de départ une variabilité du TR et de la D de 4 chacun. Si l'on diminue l'écart-type du TR de 1 unité, on gagne 11 unités de SS (il passe de 82 à 71) alors que si l'on diminue l'écart-type de la D de 1, on gagne 8 de SS (il passe de 82 à 74). Le même raisonnement a lieu lorsque le point de départ est la situation actuelle (en jaune), à savoir un écart-type du TR de 4 et un écart-type de la demande de 3.

En ce qui concerne les tôles du second type, cet impact est effectivement plus important comme on peut le constater dans le tableau 4.8. Lorsque σ_D augmente de 0 à 2, le SS optimal augmente entre 14 et 19 (en fonction de σ_{TR} initial) unités tandis que le SS optimal augmente entre 8 et 13 unités lorsque σ_{TR} passe de 3 à 5.

		Écart-type du TR σ_{TR}								
		3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5
σ_D	0	20	23	23	24	26	28	29	31	33
	0,25	20	22	23	25	26	28	30	31	33
	0,5	21	23	24	26	27	29	31	32	34
	0,75	23	25	26	28	29	30	32	33	35
	1	26	27	28	30	31	32	34	35	37
	1,25	29	30	30	32	34	35	36	37	39
	1,5	32	33	34	35	36	38	39	40	41
	1,75	35	36	37	38	39	40	42	43	44
	2	39	40	41	42	43	44	45	46	47

Tableau 4.8 : Comparaison de l'impact de la variabilité du temps de réapprovisionnement et de la demande sur le stock de sécurité optimal pour les tôles de type 2

On peut également constater que la racine carrée de la somme au sein de l'équation (11) a pour conséquence de noyer les changements de variabilité d'une variable lorsque l'autre est déjà très élevée. Par exemple, pour le premier type de tôle, lorsque l'écart-type du TR est de 5 unités, une variation de l'écart type de la D de 2 à 4 fait augmenter le stock de sécurité de 83 à 95 soit de 12 unités seulement alors que l'augmentation est de 17 unités lorsque l'écart-type de la demande est de seulement 3 unités (le SS passe de 54 à 71).

Cette différence est encore plus importante pour le second type de tôle (Tableau 4.8). En effet, une augmentation de la variabilité de la demande de 0 à 0,25 lorsque la variabilité du TR est de 5 unités n'a aucun impact sur le stock de sécurité alors que celui-ci augmente de 4 unités lorsque la variabilité de la demande augmente de 1,75 à 2.

Il est donc souvent plus efficace de diminuer dans une même proportion une grande variabilité et de laisser la faible variabilité inchangée plutôt que de laisser la grande variabilité inchangée et de réduire la faible variabilité.

Il est à noter que ce phénomène dû à la racine carrée rend identique l'impact d'une diminution d'une unité des deux écart-types lorsque le point de départ est la situation actuelle en jaune sur le tableau 4.8. En effet, une diminution d'une unité de l'écart-type des deux variabilités réduit le stock de sécurité de 5 unités dans les deux cas (il passe de 31 à 26).

Le conseil à donner à ce fabricant de cuves à mazout est, en premier lieu, de tenter de diminuer l'écart-type du temps de réapprovisionnement (ce qui profite aux deux types de tôle) en sélectionnant un fournisseur plus fiable si la valeur de cet écart-type vient d'un problème du fournisseur et, en second lieu, de tenter de diminuer l'écart-type de la demande grâce à des collaborations et des contrats avec ses clients permettant de lisser la demande.

**PARTIE 2 : LE CAS DE CATERPILLAR
BELGIUM SA**

INTRODUCTION

L'objectif de cette partie est de tester la nouvelle méthode de détermination du stock de sécurité mise en lumière lors de la première partie par l'intermédiaire de l'outil pratique qui a été développé. Comme il a déjà été mentionné, c'est le projet qui est à l'origine des recherches en matière de détermination du stock de sécurité. C'est la raison pour laquelle cette partie traitera non seulement de l'application de la méthode de détermination conjointe du stock de sécurité et de la quantité de commande mais également dans une plus large mesure, de tout ce qui touche à la réduction de l'inventaire.

Cette partie débute par une mise en contexte de la situation dans laquelle a été effectué le stage de fin d'étude au sein de Caterpillar Belgium SA pour poursuivre avec le déroulement du projet. La gestion du projet s'est inspirée de la très répandue méthodologie six sigma sans pour autant se vanter de scrupuleusement suivre cette démarche. Cette méthodologie donne une structure assez claire et offre quelques conseils quant à la résolution d'un problème. Cette démarche s'articule autour de 5 étapes : définir le problème (*Define*), mesurer la performance actuelle (*Measure*), analyser les causes du problème (*Analyze*), améliorer le processus actuel (*Improve*) et finalement contrôler le processus une fois le projet lancé (*Control*), (Pyzdek, 2003).

Cette partie se poursuivra ensuite par une évaluation de la performance de la méthode utilisée ainsi qu'une présentation des principaux obstacles rencontrés en pratique et qui peuvent mettre à mal son application.

Finalement, la partie se clôturera par les recommandations finales faites à l'entreprise.

Pour des raisons évidentes de confidentialité, il sera fait usage, dans certains cas, d'indices et non pas de valeur et, dans d'autres cas, de jours de couverture de la demande au lieu de quantité d'inventaire.

CHAPITRE 5 : CONTEXTUALISATION

Section 5.1 : Présentation de l'entreprise

Caterpillar Inc. (par la suite Caterpillar) est un grand groupe industriel américain issu de la fusion en 1925 de Holt Manufacturing Company et de C.L. Best Tractor Co. dont les origines remontent à la fin du 19^{ème} siècle. Le groupe est principalement actif dans le secteur de la construction d'engins civils et d'extraction minière avec notamment la fabrication de chargeuses sur roues et d'excavatrices (chiffre d'affaires de 24 milliards USD) mais également dans le secteur du transport et de la production d'énergie avec notamment la fabrication de moteurs marins et de locomotives (18 milliards USD). En 2015, le groupe maintient sa première place du secteur de la fabrication d'engins de chantier et d'engins miniers, loin devant ses principaux concurrents tels que Komatsu (17 milliards USD), Volvo Construction Equipment (8 milliards USD) ou encore Deere & Company (6 milliards USD) (statista, 2016).

Le groupe comporte quatre couches hiérarchiques comme le montre la figure 5.1 :

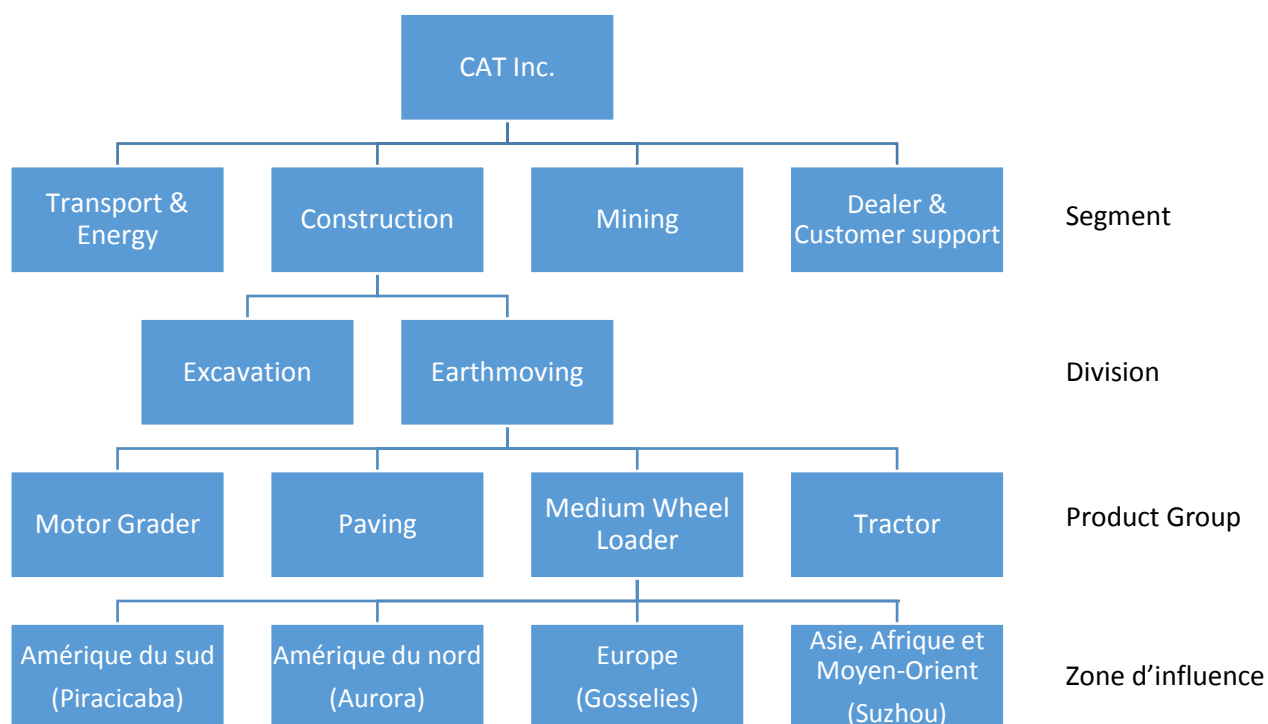


Figure 5.1 : Organisation hiérarchique simplifiée du groupe Caterpillar Inc.

La première couche correspond aux 4 différents segments de marchés visés par le groupe. La deuxième correspond aux divisions qui regroupent des produits ayant des caractéristiques similaires. La troisième couche comprend les *Product Groups*, c'est-à-dire les entités responsables d'un seul type de produit.

Finalement, pour chaque type de produit, Caterpillar dispose de plusieurs usines à travers le monde afin d'acquérir une certaine flexibilité, chère au groupe. Les usines se partagent des territoires dont elles sont responsables. Ces zones géographiques sont complètement autonomes, elles ont chacune leurs centres d'opération, centres de distribution et bureaux marketing. Seul le design des machines n'est pas aussi décentralisé.

En 1965, Caterpillar décide de faire de Gosselies son principal site d'assemblage en Europe, devenu son deuxième site le plus important au monde après celui des États-Unis (Semal, 2012). Aujourd'hui, le site emploie environ 2300 salariés et assemble des chargeuses sur roues de taille moyenne (par la suite MWL) ainsi que des pelles hydrauliques moyennes et de grande taille².

Le projet en relation avec le présent mémoire s'est déroulé au sein du « Product Group » *Medium Wheel Loader* de l'usine de Gosselies qui est responsable de sa production et de sa commercialisation pour tout le territoire européen.

En ce qui concerne les MWL, l'usine de Gosselies connaît trois usines sœurs, chacune présente dans une zone d'influence différente : Aurora (Amérique du nord), Suzhou (Asie, Afrique et Moyen-Orient) et Piracicaba (Amérique du sud). Bien que les quatre usines sœurs soient localisées dans quatre zones géographiques différentes et par conséquent satisfont quatre groupes de clients différents, il règne un climat de compétition très intense basé sur les performances qui est davantage menaçant que la compétition avec les concurrents.

Comme annoncé plus haut, la multiplicité de ses usines dans les quatre coins du monde confère à Caterpillar une excellente flexibilité. Il est par conséquent tout à fait possible de transférer la production d'un site à l'autre assez rapidement et sans trop de difficultés. Il apparaît donc, dans la mesure où une des usines se trouvait dans une situation de rentabilité suffisamment inférieure aux autres, qu'il deviendrait plus économique de fermer cette usine et de partager la production entre les usines sœurs. Même si aucun projet de ce type n'est connu, cette possibilité pousse les usines à se surpasser et à développer des stratégies de plus en plus élaborées afin de pérenniser l'activité de leur propre site.

² : Les photos des deux types de machines assemblées sur le site de Gosselies peuvent être consultées à l'annexe 5.

Section 5.2 : Crise de la demande

L'usine de Gosselies a longtemps eu une attitude que l'on pourrait qualifier de « privilégiée ». Un climat économique favorable lui permettait d'atteindre ses objectifs assez facilement, ce qui a notamment eu pour conséquence de détenir un stock de marchandises et de produits finis très important, bien plus élevé que le stock réellement nécessaire, nous y reviendrons ultérieurement.

Bien qu'au niveau mondial Caterpillar soit toujours largement en tête, la situation au niveau européen est plus nuancée. En ce qui concerne les MWL, Caterpillar et Volvo CE se partagent le titre de leader européen avec une part de marché commune supérieure à 50% suivis de Liebherr et Komatsu qui ont une part de marché plus réduite.

Jusqu'à la fin des années 2000, le territoire de l'usine de Gosselies s'étendait de l'Europe au Moyen Orient en passant par l'Afrique. Cependant, l'introduction de nouvelles normes environnementales pour les machines européennes a forcé le groupe Caterpillar à proposer deux types de configurations : une configuration peu polluante pour le marché européen et une configuration standard pour les marchés émergents tels que l'Afrique et le Moyen-Orient. Gosselies a donc abandonné la production de ces configurations standards au profit de l'usine asiatique qui se chargeait déjà de ces configurations standard pour le marché asiatique.

Cette réduction du territoire au seul marché européen a eu un impact radical sur l'activité du site. La demande du nouveau territoire représentait alors moins de la moitié de la demande du territoire précédent. Il a donc fallu passer par une importante restructuration en se séparant de la moitié de son effectif afin de s'adapter à cette nouvelle demande et de rester compétitif.

A l'aube du 21^{ème} siècle, le marché européen de la construction arrive à maturité et les grands projets de construction se font de plus en plus rares, ce qui engendre une baisse de la demande d'engins civils. De plus, la crise économique de 2008 a fragilisé le secteur de la construction en engendrant un ralentissement des chantiers. Le marché en expansion du Moyen-Orient n'est plus là pour éponger le ralentissement européen.

Caterpillar Belgium SA fait donc face à une demande historiquement faible qui l'oblige à trouver de nombreuses astuces afin de réduire ses coûts et de rester compétitif.

Section 5.3 : Description du problème

C'est dans ce contexte de crise de la demande et de pression concurrentielle interne et externe que le département OPACC prend tout son sens. OPACC³ signifie le profit net de l'entreprise diminué du coût du capital des investisseurs.

$$\begin{aligned} \text{OPACC} = & + \text{Revenus provenant essentiellement de la vente des produits} \\ & - \text{Coûts (marchandises, salaires directs, salaires indirects, autres charges)} \\ & - \text{rendement exigé} * \text{capital immobilisé (en cours de production, stock, outils)} \end{aligned}$$

Afin de maximiser l'OPACC, il est possible d'intervenir sur tous les éléments de cette équation. Le contexte économique ayant fortement diminué le premier élément, il faut plutôt s'orienter vers les deux autres.

Un des objectifs de ce département est notamment de réduire les inventaires, en priorité pour les coûts qu'ils représentent mais également en raison des ratios, domaine dans lequel l'usine de Gosselies ne figure pas parmi les plus performantes des quatre usines sœurs.

Chaque fin de mois, un serveur informatique calcule la valeur des machines présentes sur la ligne d'assemblage. Cette valeur est décomposée en plusieurs catégories, en fonction de la localisation sur la ligne d'assemblage. La valeur de l'une de ces catégories, la catégorie « *pre-POL* » est largement supérieure à celle des usines sœurs. Le département OPACC s'interroge quant aux éléments qui composent exactement cette valeur. Bien que l'entreprise maîtrise la gestion opérationnelle de ces quatre catégories, aucun département n'avait jamais vraiment pris le temps d'étudier le fonctionnement des systèmes d'information afin de comprendre d'où venait cette valeur qui constituait jusqu'alors une sorte de boîte noire. La mission du projet était donc la suivante : comprendre comment cette valeur est calculée et trouver une solution pour la diminuer. L'objectif fixé par la hiérarchie est de diminuer cette valeur de 20%. Le projet sera mis en place au deuxième semestre 2016 afin de récolter les résultats avant la fin de l'année.

Pour des raisons de confidentialité, nous exprimerons les valeurs futures en fonction de la valeur du *pre-POL* du dernier jour ouvrable de l'année 2015. Ainsi, lorsque nous dirons que l'inventaire baisse de 15\$, il baissera en réalité de 15% de la valeur de fin décembre 2015.

³ OPACC = Operational Profit After Capital Charges

CHAPITRE 6 : DEFINE

La première étape du processus d'amélioration consiste à définir le projet de manière plus précise qu'au point précédent en définissant les objectifs, en délimitant le périmètre et en expliquant le processus d'obtention de cette valeur de *pre-POL*.

Section 6.1 : Sérialisation de la marchandise

Tout d'abord, il faut faire la distinction entre les pièces sérialisées de celles qui ne le sont pas. Les marchandises sérialisées sont des marchandises disponibles mais déjà dédiées à être assemblées sur une machine spécifique. Ces pièces sont identifiées par le même numéro que le numéro de série de la machine sur laquelle elles seront assemblées. Comme dans le secteur automobile, chaque engin civil comporte un numéro de châssis qui est unique. Les composants sont généralement sérialisés dès qu'ils sont produits, s'ils sont produits en interne, ou dès qu'ils sont réceptionnés pour les composants produits en externe. Cependant, il existe quelques exceptions comme le moteur qui n'est sérialisé manuellement que peu de temps avant sa consommation ainsi que les composants qui peuvent être assemblés sur n'importe quelle machine comme la quincaillerie qui, eux, sont sérialisés de manière automatique au moment même de la consommation.

Cette sérialisation des composants poursuit un double rôle. Le premier est d'éviter les erreurs d'assemblage en facilitant le repérage des pièces par les opérateurs et le second est d'avoir une visibilité sur la quantité de machines qui peuvent potentiellement être assemblées étant donné la disponibilité de tous les composants qui la constituent. Les pièces non sérialisées sont comptabilisées comme étant du pur stock tandis que les pièces sérialisées sont considérées comme étant de l'en-cours.

Section 6.2 : Système d'information

Deux applications distinctes reprennent la valeur de l'inventaire : DITCAR et PPCAR. La première, DITCAR, reprend la valeur des composants non sérialisés tandis que la seconde reprend la valeur

des composants sérialisés. Ces applications sont étroitement liées étant donné que la plupart de la marchandise passe de DITCAR à PPCAR.

Par exemple, une fois que le châssis arrière est fabriqué au sein de l'usine de Gosselies, un numéro de série lui est attribué. La valeur de tous les composants de ce châssis qui figuraient jusqu'alors dans DITCAR étant donné qu'ils n'étaient pas sérialisés, basculent dans PPCAR. Voici un exemple de rapport de PPCAR :

MODEL	SERIAL #	SHIPPING ORDER #	UNFORMED MATERIAL	CTCO-FORMED	PURCHASED ROUGH	PURCHASED FINISHED	VALUE-ADDED COST	TOTAL	SDA
966	DYC01088		0,00	0,00	0,05	2,69	0,88	3,61	3,28
966	DYC01089		0,00	0,00	0,04	2,90	0,87	3,82	3,49
966	DYC01090		0,00	0,00	0,05	2,96	0,91	3,91	3,59
966	DYC01091		0,00	0,00	0,05	2,73	0,88	3,66	3,34
966	DYC01092		0,00	0,00	0,05	2,86	0,90	3,80	3,47
966	DYC01093		0,00	0,00	0,05	2,43	0,53	3,01	3,01
966	DYC01094		0,00	0,00	0,04	2,30	0,50	2,85	2,85
966	DYC01095		0,00	0,00	0,04	2,30	0,50	2,85	2,85
966	DYC01096		0,00	0,00	0,04	2,27	0,49	2,81	2,81
966	DYC01097		0,00	0,00	0,05	2,34	0,51	2,89	2,89
966	DYC01098		0,00	0,00	0,05	2,29	0,49	2,83	2,83
966	DYC01099		0,00	0,00	0,05	2,13	0,47	2,64	2,64
966	DYC01100		0,00	0,00	0,05	1,33	0,39	1,76	1,76
966	DYC01101		0,00	0,00	0,04	1,27	0,36	1,67	1,67
966	DYC01102		0,00	0,00	0,00	0,75	0,19	0,94	0,94
966	DYC01103		0,00	0,00	0,00	0,55	0,09	0,64	0,64
966	DYC01104		0,00	0,00	0,00	0,26	0,05	0,31	0,31
966	DYC01105		0,00	0,00	0,00	0,26	0,05	0,31	0,31
966	DYC01106		0,00	0,00	0,00	0,17	0,01	0,19	0,19
966	DYC01107		0,00	0,00	0,00	0,16	0,01	0,17	0,17
966	DYC01108		0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08
966	DYC01109		0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08
966	DYC01110		0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08
966	DYC01111		0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,08

Tableau 6.1 : Rapport journalier de PPCAR en base 100.

Ce rapport reprend le numéro de série des machines et leur associe différentes valeurs dont la somme, comptabilisée dans la colonne « TOTAL », n'est autre que la somme des valeurs de ses composants qui ont été sérialisés. Pour reprendre l'exemple du châssis arrière, une fois sérialisé, ce châssis va faire gonfler la valeur associée au numéro de série de la machine dont il fera partie. Il est possible que cette valeur ne contienne rien d'autre que la valeur de ce châssis ou bien qu'elle contienne également la valeur d'un autre composant sérialisé.

Chaque fin de mois, un employé du département des finances, reprend la dernière version de cette liste et va attribuer une catégorie à chaque numéro de série. Ces catégories correspondent aux 4 différentes parties de la ligne d'assemblage que voici :

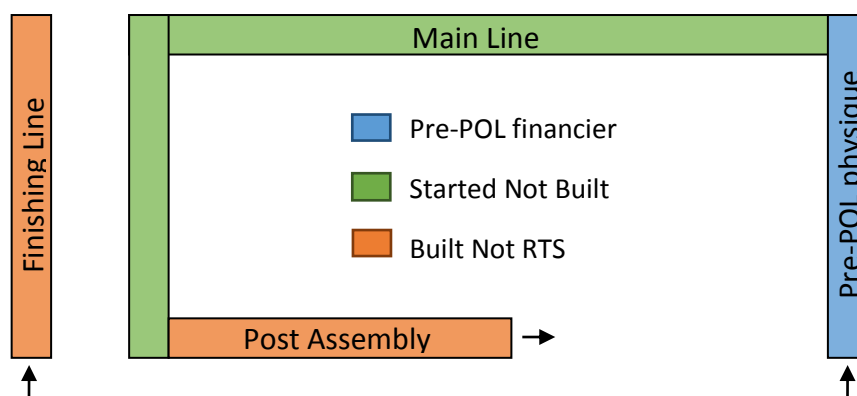


Figure 6.1 : Représentation simplifiée de la ligne d'assemblage des chargeuses sur roues

La première partie de la ligne d'assemblage des MWL s'intitule le *pre-POL* physique. C'est le lieu des étapes préparatoires au mariage entre le châssis avant et le châssis arrière. Ensuite la machine entre sur la ligne principale « *Main Line* » où on va lui greffer une multitude de composants comme le moteur ou la cabine. Une fois que la machine a quitté la « *Main Line*, » elle peut se mouvoir d'elle-même mais doit encore subir des opérations de post assemblage dans la partie que l'on appelle « *Post Assembly* ». Finalement, la machine se déplace jusqu'au tunnel de finition, la « *Finishing Line* » afin de subir les derniers ajustements.

Lorsque l'on parlera de valeur des machines et non pas des parties physiques de la ligne d'assemblage, les termes utilisés sont les suivants : *pre-POL* financier en bleu (par la suite PPF) en lieu et place de *pre-POL* physique, *Started Not Built* en vert (par la suite SNB) au lieu de *Main Line* et *Built Not Ready To Ship* (par la suite BNRTS) en orange en lieu et place de *Post Assembly* et de *Finishing Line*.

Par exemple, si la machine DYC01093 du Tableau 6.1 se trouve sur le *pre-POL* physique, sa valeur de 3,01\$ sera attribuée à la catégorie *pre-POL* financier. Dès que cette machine va franchir la 1^{ère} étape de la *Main Line*, sa valeur ainsi que la valeur de l'intégralité de ses composants sérialisés quitteront le *pre-POL* financier et basculeront dans le *Sarted Not Built*.

6.2.1 Première déduction

Le premier enseignement à tirer de cette définition est que la valeur financière de la machine est largement supérieure à sa valeur réelle. Puisque la sérialisation est soit antérieure soit simultanée à la consommation, les composants de la machine auront déjà été comptabilisés dans PPCAR, à savoir sa valeur financière, alors qu'ils n'ont pas encore été assemblés sur celle-ci.

6.2.2 Deuxième déduction

Comme cela a été évoqué auparavant, il est d'usage de sérialiser les composants le plus tôt possible afin de donner une visibilité de l'horizon des machines qui sont faisables. Il n'est donc pas rare de retrouver certains composants déjà sérialisés alors que le châssis n'est même pas encore en production. On va dès lors retrouver dans PPCAR le numéro de série d'une machine avec comme valeur, la valeur de cet unique composant.

Par exemple, si l'on reprend le tableau 6.1, la valeur de la machine DYCO1111 dont le châssis n'était pas encore en production au moment de la photo, n'a une valeur que de 0,08\$, ce qui correspond à la valeur unitaire d'un kit.

Le *pre-POL* financier ne commence donc pas au même moment que le *pre-POL* physique mais bien avant, lors de la production ou de la réception des tous premiers composants sérialisés.

Ces découvertes furent déterminantes. En réalité, la valeur du *pre-POL* financier ne comprend pas seulement la valeur des composants qui sont physiquement sur la ligne de sous assemblage *pre-POL* mais également de tous les composants en stock qui ont déjà été virtuellement alloués à une machine spécifique pour autant que le châssis ne soit pas encore en *Main Line* et ce, même si la machine en question n'est pas encore en production.

Ce qui signifie par exemple que le châssis arrière, qui est fabriqué en interne 4 jours avant d'entrer sur la ligne de sous assemblage « *pre-POL* physique », fait déjà partie du *pre-POL* financier. On a donc dans ce PPF l'équivalent d'environ 5 jours d'inventaire de châssis arrière (4 jours de stock + 1 jour d'en-cours) soit 5 fois plus que dans le PPP. La valeur du *pre-POL* financier est donc de très loin supérieure à la valeur du *pre-POL* physique.

Section 6.3 : Pertinence de la comparaison entre usines sœurs

Le fait de sérialiser les composants dès que possible afin de se donner une visibilité a eu pour conséquence de gonfler cette valeur de *pre-POL* financier et de la rendre incomparable avec celle des usines sœurs qui ne fonctionnent pas de la même manière. Parmi celles-ci, certaines considèrent que tous ces composants sérialisés non consommés, étant donné qu'ils ne sont pas assemblés sur une machine, ne constituent en rien de l'en-cours, ils font donc partie de l'inventaire traditionnel. Le *benchmark* actuel entre les usines sœurs doit donc être revu afin de prendre en compte cette différence de définition et de ne pas pénaliser à tort l'usine de Gosselies.

CHAPITRE 7 : MEASURE

Une fois que la définition du *pre-POL* est connue, la deuxième étape consiste à mesurer sa valeur et établir une liste précise de ses composants. Cela permet d'évaluer la performance actuelle de la gestion des stocks mais également de pouvoir juger de la réussite du projet en comparant les mesures à priori et à posteriori.

Section 7.1 : Valeur globale du *pre-POL* financier

Grâce à l'application PPCAR, il était facile de connaître la valeur du *pre-POL* à la fin de chaque mois de l'année 2015. Ces valeurs sont compilées dans la figure 7.1. Bien qu'elle varie beaucoup d'un mois à l'autre, la valeur du *pre-POL* financier reste plutôt stable et oscille entre 90% et 120% de la valeur de fin décembre 2015.

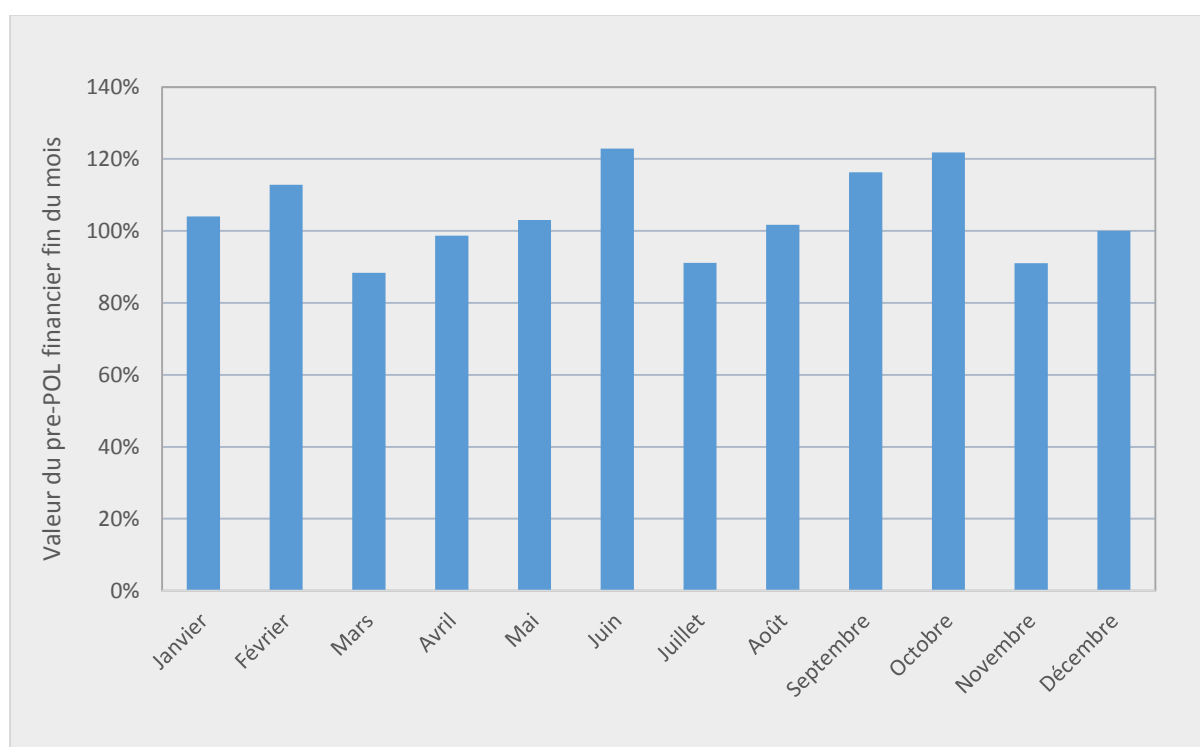


Figure 7.1 : Évolution du *pre-POL* financier de janvier à décembre 2015 avec la valeur du *pre-POL* financier du dernier jour ouvrable du mois de décembre 2015 comme base 100.

Section 7.2 : Composition du *pre-POL* financier

En revanche, PPCAR ne permet pas d'établir une liste de la composition du *pre-POL* financier. Personne n'est en mesure d'expliquer comment cela fonctionne. Avec la restructuration opérée en 2013, les employés les plus âgés ont été prépensionnés et sont malheureusement partis avec leur connaissance. Personne ne sait donc comment cette valeur est calculée ni même si elle est correcte.

Avec l'aide d'Emmanuel Goffaux, nous avons adapté un outil déjà existant afin de recomposer cette valeur par une approche *bottom-up* en capturant des éléments sérialisés. Le problème c'est que cet outil ne parvient pas à la même valeur que PPCAR. Pour preuve, la valeur du *pre-POL* financier selon l'outil en avril 2016 est de 61\$ alors qu'il est de 75\$ selon PPCAR. Il n'est pas possible de déterminer quelle est la bonne valeur parmi ces deux méthodes. Le premier diagramme de Pareto fiable a pu être établi le 30 mars 2016.

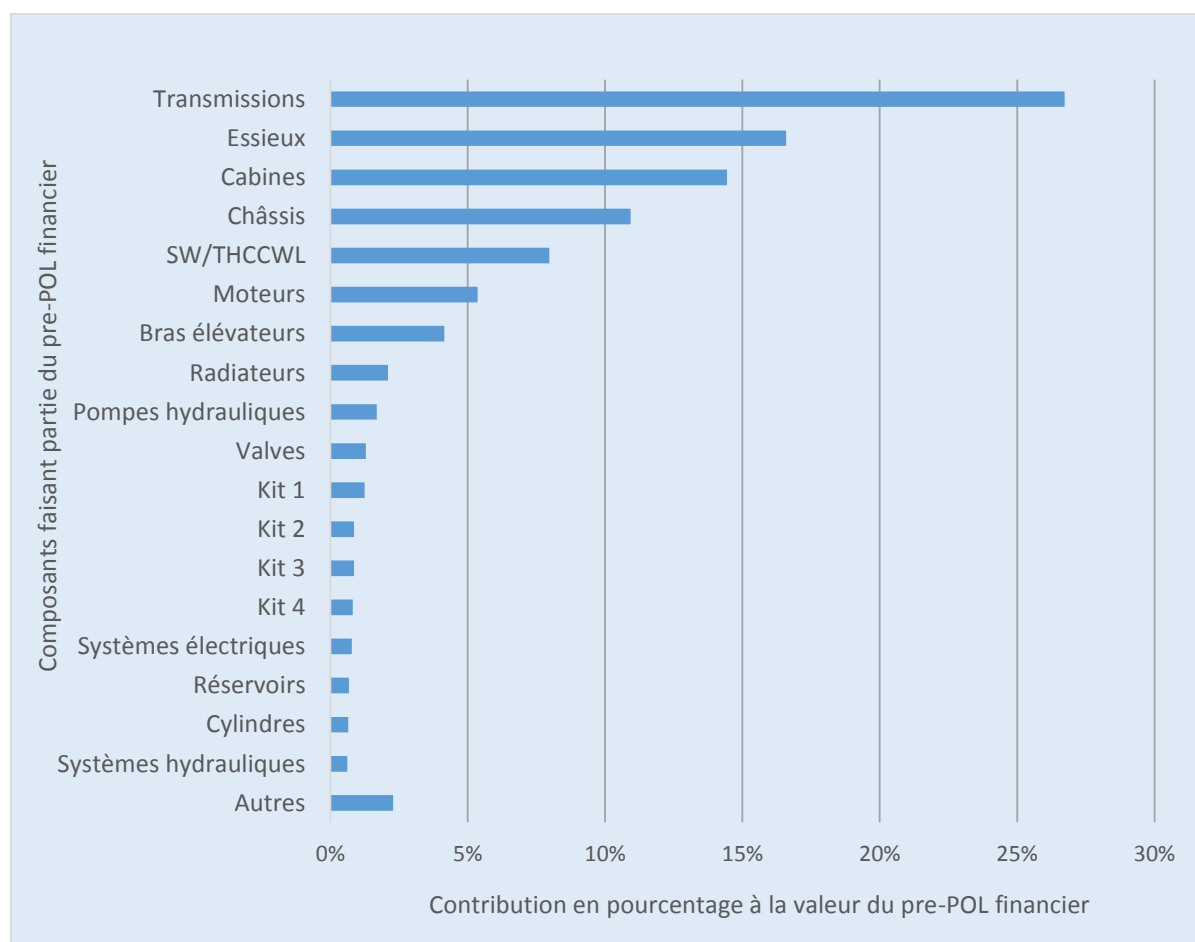


Figure 7.2 : Composition du *pre-POL* financier au 30 mars 2016

Les six premières familles de composants représentent à elles seules plus de 80% de la valeur du *pre-POL* financier. Nous conservons ces six éléments pour l'analyse.

Section 7.3 : Prise en compte des éléments non sérialisés du Pareto

7.3.1 Illustration du concept de la file d'attente

Étant donné que le planning de production respecte un ordre spécifique des machines, les composants qui sont assemblés aux différentes étapes de la ligne d'assemblage sont eux aussi ordonnés comme dans une file d'attente.

	Poste	LA	File d'attente	Composant
FL	P8 : Pose du godet	1	2 3 4 5 6 7 8 9 10 11	Godet
	P7 : Fixation des roues	2	3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	Roues
PA	P6 : Pose du capot	3	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	Capot
	P5 : Pose du bras élévateur	4	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	Bras élévateur
ML	P4 : Pose de la cabine	5	6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	Cabine
	P3 : Pose du moteur	6	7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	Transmission
			9 10 11 12 13 14 15 16	Moteur
PPF	P2 : Pose des essieux	7	8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	Essieux
	P1 : Mariage des châssis	8	9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	Châssis avant
			9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	Châssis arrière

Figure 7.3 : Illustration du concept de la file d'attente des différents composants en fonction de leur localisation sur la ligne d'assemblage (LA). L'ordre et le nombre de postes représentés ne correspondent pas à la réalité.

La figure 7.3 reprend en ordonnée la ligne d'assemblage des MWL avec les différentes parties successives : *pre-POL* physique (PPP), *Main Line* (ML), *Post Assembly* (PA) et *Finishing Line* (FL) et en abscisse la file d'attente des différents composants. Les machines étant toutes différentes les unes des autres, les composants sont déjà ordonnés dans la file d'attente afin d'éviter les erreurs. Parmi ces composants, certains font partie de la catégorie PPF en bleu, d'autres font partie de la catégorie SNB en vert ou de la catégorie BNRTS en orange. Ceux qui ne font partie d'aucune de ces catégories, font partie du stock traditionnel appelé *PSI* en jaune. Il n'existe qu'une seule file d'attente par type de composants bien que les composants viennent de plusieurs types de fournisseurs et soient sérialisés à différents moments comme les transmissions. Les carrés représentent un processus de production tandis que les cercles représentent un composant à l'état d'inventaire.

Pour certains composants, la file d'attente est composée exclusivement de composants sérialisés comme les cabines ou encore les transmissions de l'un des fournisseurs qui sont sérialisés dès la réception (première ligne du poste 3 de la figure 7.3). Pour d'autres, la file d'attente est principalement constituée de composants non sérialisés comme les moteurs qui sont sérialisés peu de temps avant la consommation (deuxième ligne du poste 3 sur la figure 7.3). Pour ces derniers, réduire l'inventaire et donc la file d'attente ne réduira que la quantité de composants non sérialisés et ne diminuera en aucun cas les composants sérialisés qui figurent toujours aux premières places de cette file d'attente.

Que ce soit de l'inventaire sérialisé ou non sérialisé, les marchandises constituent tout de même de l'immobilisation de capital. C'est la raison pour laquelle il a été décidé de dévier de l'objectif initial de réduction du PPF en incluant également les composants non sérialisés du TOP 5 du Pareto précédent. De cette manière, le projet permettra de non seulement diminuer le PPF mais également de diminuer d'une manière non négligeable l'inventaire non sérialisé.

La figure 7.3 permet également de visualiser le décalage important entre le PPP (3 composants sur les postes 1-2 de la LA) et le PPF (74 cercles et carrés bleus) abordé lors du paragraphe 6.2.2.

7.3.2 Actualisation du classement des contributeurs du pre-POL financier

Le tableau 7.1 reprend le classement définitif des 6 familles retenues ainsi que la décomposition de la valeur entre les différents membres d'une même famille. Chaque famille de composants comprend plusieurs origines en fonction de la localisation du fournisseur et chaque fournisseur propose plusieurs modèles de composants. Malheureusement, la récolte des données pour les familles 5 et 6 s'est avéré être compliquée et n'a pu être complétée faute de temps.

Famille	Fournisseur	Origine	Valeur	Valeur totale
1	11	USA	\$52	\$58
	12	GB	\$6	
2	21	USA	\$25	\$35
	22	FR	\$10	
3	31	USA	\$11	\$25
	32	BE	\$7	
	33	GB	\$6	
4	41	BE	\$15	\$15
5	51	POL	\$4	\$8
	52	BE	\$3	
6	61	BE	\$5	\$5
			Total	\$146

Tableau 7.1 : Valeur des différentes familles de composants sélectionnés pour l'analyse avec comme base 100 la valeur du pre-POL financier de fin décembre 2015

CHAPITRE 8 : ANALYZE

Cette 3^{ème} phase du processus DMAIC de la méthodologie six sigma a pour but de chercher à comprendre le processus complet de gestion des stocks pour pouvoir identifier les causes principales qui ont mené à une situation aussi peu efficace. Cette phase comprend à la fois la description et l'analyse de la gestion actuelle des stocks.

Section 8.1 : Gestion des stocks

8.1.1 Prévisions

La première étape du processus de gestion des stocks est la prévision. Tout d'abord, une personne, basée au siège mondial aux États-Unis, est en charge de la prévision du marché européen des MWL. Elle transmet ses prévisions à une personne localisée sur le site même de Gosselies qui va prévoir le nombre de machines que Caterpillar va vendre en fonction essentiellement de l'atmosphère concurrentielle. C'est ensuite au tour du département du planning de décomposer cette estimation globale pour chacun des 8 modèles de MWL que Gosselies propose avec l'aide du PAN. Le PAN est le mix de vente des machines, recalculé à intervalles réguliers. C'est finalement le dernier maillon de la chaîne qui, sur base des prévisions de vente des machines, va déterminer les options qui vont être choisies par le client grâce à un mix prédéfini. En fonction des estimations des différentes options vendues, il est enfin possible d'estimer la quantité de chaque composant dont l'usine aura besoin et à fortiori qu'il est nécessaire de commander.

Les deux derniers maillons de la chaîne vont ajuster le plan de production en fonction des commandes qui sont effectivement passées. Si le flux ou le nombre de commandes est inférieur ou supérieur aux prévisions, alors ils prennent la décision de modifier le plan de production initial. Il faut savoir que plus on se rapproche de la date de production plus le changement autorisé du planning de production est faible, il est même nul lorsque la date de production est endéans les 20 jours ouvrés.

8.1.2 Material Requirement Planning (MRP)⁴

Ces prévisions sont encodées dans MRP qui va calculer la quantité qu'il faut commander grâce à un raisonnement rétrograde (*Backward induction*).

	Semaine 1					Semaine 2				
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Demande	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
QL								10 (B)		
Inventaire	16	14	12	10	8	6	4	2 (A)	0	-2
QC			10 (C)							

Tableau 8.1 : Exemple de fonctionnement d'MRP

Dans l'exemple ci-dessus, la demande journalière moyenne du composant était de 2 durant l'année 2015, la quantité de commande optimale est de 10 unités, le stock de sécurité optimal est de 4 unités et le temps de réapprovisionnement est de 5 jours. MRP va projeter l'état du stock en fonction de cette demande moyenne. Il va ensuite détecter à partir de quel moment le niveau d'inventaire va descendre en dessous du seuil critique de 4 unités (A). Il va donc prévoir une commande pour cette date (B) et calculer à quelle date faut-il passer une commande au maximum afin que la marchandise soit disponible à cette date précise (C). Le tableau actualisé donne ceci :

	Semaine 1					Semaine 2				
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Demande	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
QL								10		
Inventaire	16	14	12	10	8	6	4	12	10	8
QC			10							

Tableau 8.2 : Exemple de fonctionnement d'MRP

Les propositions de commandes sont effectuées en respectant les contraintes paramétrées afin qu'il y ait suffisamment de matériel pour que la ligne d'assemblage ne tombe pas en panne. Il existe plusieurs types de contraintes telles que la quantité minimale de commande (MOQ) ou encore le stock minimal (MIB) qui correspond au stock de sécurité.

La quantité minimale d'inventaire est calculée selon une méthode spécifique à Caterpillar. Elle correspond au maximum du changement auquel le département du planning est autorisé à changer.

⁴ MRP est un système d'information permettant la planification du matériel de production. C'est un système créé dans les années 1960 qui est encore utilisé de nos jours dans des systèmes intégrés comme les ERP.

Par exemple, admettons que pour un temps de réapprovisionnement de 30 jours, la modification maximale des prévisions soit de 10%. Cette méthode va calculer quelle est la quantité maximale qui peut être modifiée, admettons 2 jours d'inventaire. Le stock de sécurité paramétré dans MRP sera donc de 2 jours d'inventaire.

Le stock de sécurité qui est défini selon cette méthode n'a donc pas pour but de se prémunir contre la variabilité de l'approvisionnement mais simplement de la variabilité de la demande.

8.1.3 Les planificateurs de matériels (*Material planners* ou *PM*)

Ce sont finalement les planificateurs de matériels qui vont entériner la décision finale de la quantité à commander et du moment de la commande sur base des propositions d'MRP et en fonction des informations dont ils disposent. Ce sont également eux qui vont gérer tous les conflits et les requêtes des fournisseurs.

8.1.4 Les composants *pull*

Les composants gérés en flux tiré (*pull*) sont les composants qui ne sont commandés que lorsqu'une consommation effective est réalisée, comme le système des cartes KANBAN, à l'inverse des composants gérés en flux poussé (*push*) qui sont commandés à intervalles réguliers sans prise en compte de la consommation effective. Lors d'un blocage de la production, les composants *push* continueront d'être produits tandis que la production des composants *pull* sera interrompue. Ce système de gestion de l'inventaire permet d'avoir une maîtrise de l'inventaire et d'éviter une accumulation de celui-ci en cas de problème (Chevalier, 2015).

Afin de pouvoir gérer les composants en *pull*, il est impératif qu'au moment où la production s'arrête, l'approvisionnement puisse aussi s'arrêter. C'est pourquoi le temps de réapprovisionnement ne doit pas dépasser une certaine limite. Dans le cas de Caterpillar, cette limite est fixée à 20 jours ouvrables, c'est-à-dire l'horizon de planification des MWL.

Pour ces composants, il n'existe pas de MIB paramétré dans MRP ni de méthode de détermination du stock de sécurité. C'est donc au feeling que les PM décident de la quantité d'inventaire que l'on va conserver en stock de sécurité. Et cela pour se prémunir de la variabilité de la demande mais également de la variabilité de l'approvisionnement.

Section 8.2 : Maximisation de la disponibilité

L'unique objectif du département du planning et des *materials planners* est de maximiser la disponibilité des marchandises afin de ne paralyser en aucun cas la production des MWL qui est une ligne tirante. Il en résulte qu'à chaque étape du processus de gestion des stocks, une marge de sécurité est ajoutée.

Tout d'abord, les prévisions concernent la demande du marché et non pas la demande que Gosselies est capable de satisfaire. Il est inutile de prévoir une production de MWL qui frôle avec la capacité maximale. Il existe toujours des petits soucis de ligne qui ne permettent pas d'atteindre la productivité maximale. Les prévisions totales des différents types de MWL ne doivent excéder la capacité effective moyenne.

Imaginons que les prévisions de production de MWL soient de 20 par jour alors qu'en moyenne Gosselies arrive à en produire 19. Admettons également que les moteurs mettent 50 jours ouvrables avant de parvenir à Gosselies. Parmi les 1000 moteurs qui ont été commandés, seulement 950 auront été effectivement consommés conformément à la moyenne. Gosselies va donc se retrouver avec 50 moteurs excédentaires. La prochaine commande sera plus faible de 50 moteurs étant donné que l'usine dispose déjà de 50 moteurs mais le même problème aura lieu : 950 moteurs auront été commandés pour une production estimée de 1000 alors que 950 moteurs auront été effectivement consommés. À moins que la production soit anormalement très efficace, ces moteurs vont se retrouver en permanence dans l'inventaire de Gosselies. De plus, pour les composants qui sont moins utilisés, c'est à dire lorsque les prévisions se situent entre 0,5 et 1 unité par jour, celles-ci vont être arrondies à l'unité.

Par exemple, admettons qu'il existe 40 moteurs utilisés à part égale. Les prévisions pour une journée sont de $20/40 = 0,5$ unité, on va donc faire venir un moteur de chaque type pour pouvoir satisfaire la demande, il en résultera un surplus de 20 moteurs.

Le calcul du temps de réapprovisionnement comporte lui aussi sa marge de sécurité. On y ajoute une journée de traitement de la commande, une journée de distribution et le temps de transit est volontairement surestimé. Cela a pour conséquence que les commandes sont souvent livrées avant la date espérée, l'inventaire reste donc quelques jours de plus que prévu.

Personne ne prend en compte l'impact économique de ces stratégies. Pourtant, Il est parfois plus judicieux de volontairement perdre une vente ou du moins de la postposer afin de réduire l'inventaire moyen qui peut coûter très cher pour les composants ayant les plus grandes valeurs.

Section 8.3 : Pas de prise en compte du coût de transport

Ce qui guide les commandes est soit la demande pour les composants *pull* soit les prévisions par l'intermédiaire d'MRP pour les composants *push*. MRP n'est pas documenté pour maximiser le remplissage des transports, il commande donc le strict minimum. Les *material planners* n'ont pas pour objectif de maximiser le remplissage du transport à quelques rares exceptions près comme les composants des fournisseurs 33 et 51 qui font l'objet d'une collaboration étroite avec Gosselies et qui ont un taux de remplissage frôlant les 100%.

Section 8.4 : Performance de certaines lignes de sous-assemblage

Certaines lignes de sous-assemblage, en particulier la ligne de mariage des composants de la famille 1 et 2, sont significativement plus performantes que la ligne d'assemblage. Cette différence de productivité résulte en un goulot d'étranglement et une accumulation de composants entre la ligne de sous-assemblage et la ligne d'assemblage. Cette différence est si importante que la ligne de mariage des composants des familles 1 et 2 doit volontairement être mise à l'arrêt plusieurs demi-journées par mois afin que la ligne d'assemblage rattrape son retard. Cette situation n'est pas efficace car les employés de la ligne de sous-assemblage ne sont pas productifs pendant ces arrêts de la ligne de sous assemblage.

Section 8.5 : Longueur de la partie « *pre-POL* » de la ligne d'assemblage

Un *benchmark* est régulièrement fait entre les quatre usines sœurs du groupe Caterpillar. L'usine de Gosselies possède de nombreux postes en comparaison avec les usines sœurs. La multiplication de ces postes entraîne une valeur des en-cours de production beaucoup plus importante. En effet, on peut facilement comprendre que la valeur d'une ligne d'assemblage où toutes les opérations sont centralisées en un seul poste a une valeur nettement inférieure à une ligne d'assemblage où les opérations sont divisées en plusieurs postes distincts étant donné que certains composants sont présents plusieurs fois sur la ligne d'assemblage.

CHAPITRE 9 : IMPROVE

L'une des principales sources d'un inventaire important identifiées lors du chapitre 8 réside dans la mauvaise compréhension du stock de sécurité. En effet, le SS doit être le seul rempart face à l'incertitude. Un moyen de diminuer l'inventaire est donc d'identifier le stock de sécurité adéquat et d'éliminer toutes les autres marges de sécurité. Ce chapitre devait à la fois trouver une méthode efficace de détermination du SS ainsi que l'utiliser afin de réduire l'inventaire. Nous ne reviendrons pas sur cette recherche qui a été détaillée lors de la première partie, nous nous contenterons de l'utiliser et d'analyser les résultats. Nous aborderons également d'autres sujets que la détermination du stock de sécurité étant donné que le projet lié au mémoire avait pour objectif initial de répondre au problème plus large de valeurs du *pre-POL*.

Section 9.1 : Préambule

Avant de passer à la détermination du SS, il est nécessaire de revoir la méthode actuelle de gestion des inventaires. Afin que le stock de sécurité ait du sens, il est nécessaire de supprimer les marges de sécurité qui sont prises à tous les étages. C'est pourquoi on estimera dans ce chapitre la demande par la moyenne de la demande journalière durant l'année qui s'est écoulée et non plus sur base de prévisions optimistes. À moins qu'il y ait des informations confirmant une hausse certaine de la demande, il n'est pas nécessaire de modifier les prévisions. En effet, un des objectifs du stock de sécurité est de pouvoir palier à une hausse non prévue de la demande. Le but du stock de sécurité est d'être utilisé. S'il n'est jamais utilisé alors il est inutile et il constitue l'un des 7 déchets selon le système de production de Toyota (Meyerson, 2012).

Afin d'intégrer les recommandations suivantes, il suffit simplement de modifier deux paramètres dans le logiciel MRP. En premier lieu, il faut remplacer le MIB par le stock de sécurité calculé et d'inclure la quantité de commande dans les multiples. MRP veillera donc à commander des multiples de la quantité de commande afin d'atteindre l'efficacité optimale tout en veillant à ne jamais descendre en dessous du stock de sécurité. Les commandes calculées dans MRP sont des propositions, le *PM* peut toujours modifier ces propositions s'il juge qu'elles ne sont pas pertinentes. Par exemple, si certains composants doivent être combinés pour le transport, il peut-être plus opportun d'attendre afin d'effectuer une commande groupée. Dans le cas contraire, les coûts de transport s'envoleraient.

Section 9.2 : Détermination du stock de sécurité et prise en compte du coût de transport

L'outil développé lors du chapitre 4 permet à la fois de déterminer le stock de sécurité mais également d'intégrer les coûts de transport jusque-là laissés de côté, faute d'outil, par l'intermédiaire du calcul de la quantité de commande optimale.

L'ensemble des informations nécessaires à l'utilisation de cet outil ont été centralisées dans le tableau aux annexes 6 et 7. Pour des raisons de confidentialité, la plupart des informations ont été modifiées afin de ne pas nuire à la société. La demande par composant ou famille est exprimée en pourcentage de la production journalière de MWL, l'écart-type de la demande est exprimé sous forme de variabilité en pourcentage de la demande et la valeur des composants ou les coûts sont toujours exprimés sur la base 100. Ce tableau permet tout de même de mieux appréhender les différences entre les familles.

9.2.1 Estimation des paramètres

De nombreuses données n'étaient pas disponibles, elles ont dû être calculées ou estimées. Malheureusement, ces estimations réduisent la qualité de la solution.

Demande journalière

Il n'y avait aucune information précise quant à la demande journalière moyenne ainsi que l'écart-type des composants. C'est sur base des données de sérialisation que nous avons calculé une estimation de cette demande et de cet écart-type. L'inconvénient est que la sérialisation et la consommation ne sont pas toujours corrélées. Ainsi, il est possible que l'opérateur sérialise les marchandises qui devraient être assemblées le jour même mais que cet objectif ne soit pas atteint. Il en résultera que la sérialisation de cette journée sera supérieure à la consommation tandis que ce sera l'inverse pour le lendemain étant donné que certaines marchandises auront déjà été sérialisées la veille. De plus, la sérialisation de la marchandise en *pull* se fait dès la réception. Si la livraison a lieu tous les deux jours, la marchandise sera entièrement sérialisée le même jour et rien le lendemain. La sérialisation est beaucoup plus erratique que la demande, ce qui engendre un écart-type globalement plus important.

Cependant, cette sérialisation était compilée hebdomadairement dans le fichier initial, ce qui a pour conséquence ici d'engendrer un écart-type plus réduit qu'en réalité étant donné qu'une valeur extrême un jour peut être compensée par une valeur extrême opposée d'un autre jour.

Variabilité du temps de réponse

Des informations existent quant à la fiabilité du fournisseur mais elles comprennent un pourcentage de commandes livrées à temps. On a aucune idée de l'ampleur de ce retard, or c'est bien cela qui est le plus important. J'ai donc estimé grossièrement quel pourrait être l'écart-type du temps de réapprovisionnement pour chaque destination. Pour cela, j'ai pris en compte la valeur absolue du temps de réapprovisionnement mais surtout le moyen de transport. En effet, le voyage par bateau est très variable. Il ne fallait pas traiter de la même façon une marchandise qui met 25 jours pour être fabriquée et qui met 25 jours en bateau et une marchandise qui met 45 jours à être fabriquée et qui met 5 jours par camion. Ces estimations sont purement subjectives mais elles ne devraient néanmoins pas trop s'éloigner de la réalité. Dans cette dynamique de sécurité, valorisée au sein de l'entreprise, il a été choisi de plutôt surestimer que sous-estimer cette variabilité.

Variabilité de la quantité livrée

De l'aveu des *Materials Planners*, la variabilité de la quantité livrée est très limitée. Il a néanmoins été décidé de l'estimer à hauteur de 2% de la quantité livrée.

9.2.2 Calcul de la solution optimale

Pour des raisons de confidentialité, aucune indication de volume de production ni de valeur unitaire des composants ne sera divulguée. Les données seront exprimées en nombre de jours de couverture de la demande pour la quantité d'inventaire et sous forme d'indice avec comme base 100 la valeur du pre-POL financier de décembre 2015 quand il s'agira de valeur.

Famille 1 : fournisseur 11 : États-Unis

Ces composants provenant des États-Unis sont consolidés à un *cross-dock* avant d'être envoyés par bateau vers la Belgique. Le *cross-dock* est un lieu de centralisation de marchandises afin d'être reconditionnées. Dans cet exemple, les composants venant de tous les États-Unis sont envoyés à ce *cross-dock* afin d'être réunis dans un même conteneur et envoyés en Belgique. Cette navette n'a lieu qu'une fois par semaine, la quantité de commande correspond donc au minimum à la demande pendant une semaine. Il est à noter que la quantité par conteneur ne

correspond pas toujours à la quantité de commande. La capacité maximale du conteneur peut être atteinte, il faudrait par conséquent plus d'un conteneur mais il peut également s'avérer plus économique de transporter deux conteneurs à moitié pleins plutôt qu'un conteneur plein. Ce n'est pas le cas de ces composants mais ce sera le cas des composants du fournisseur 21.

Comme expliqué lors du chapitre 4, lorsque plusieurs types de composants empruntent le même chemin, il est nécessaire de recourir à une astuce afin de connaître la QC. En considérant tous les composants comme étant du même type, avec une demande journalière de 100% et une variabilité de 35% obtenue en effectuant une moyenne géométrique de la variabilité de chaque type, ce qui n'est pas correct mais a peu d'importance étant donné qu'ici l'important c'est la QC. Le calculateur fournit une QC optimale de 1,97 jours soit la capacité maximale du conteneur. Par conséquent, nous savons qu'il sera plus économique de commander une fois 2, une fois 3 conteneurs pleins plutôt que 2,5 conteneurs par semaine comme l'aurait suggéré la moyenne hebdomadaire. En effet, cette alternance permet de réduire les coûts de transport annuels de 12\$ à 11,16\$.

Il faut à présent reprendre le calculateur, insérer les paramètres pour chaque type de moteur et sélectionner le stock de sécurité optimal (SS) correspondant à une quantité de commande de 5 jours (QC). De cette façon, nous obtiendrons le stock de sécurité correspondant à la bonne fréquence d'arrivée de la marchandise.

Fournisseur	Composant	QC	SS
11	111	5	7,1
	112		17
	113		8,4
	114		8,5
	115		7,5

Tableau 9.1 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 11

Famille 1 : fournisseur 12 : Angleterre

Cette famille est le cas le plus simple étant donné qu'elle n'est composée que d'un seul modèle. Le remplissage des informations dans le calculateur est donc aisé. Le stock de sécurité optimal est de 6,35 jours de couverture de la demande et la quantité de commande correspond à la demande de 3,63 jours. Dans ce cas-ci le paramètre « multiples » d'MRP peut être remplacé par 3,63 jours ainsi que le paramètre « MIB » par 6,35 jours de couverture de la demande.

Famille 2 : fournisseur 21 : États-Unis

Ces composants provenant des États-Unis sont également consolidés à un *cross-dock* avant d'être envoyés par bateau vers la Belgique.

Tout comme les composants du fournisseur 11, nous considérons ces composants comme formant un seul modèle, avec une demande journalière de 100% et une variabilité cette fois-ci de 43%. Le calculateur fournit une QC optimale de 1,88 jours. Par conséquent, nous savons qu'il sera plus économique de commander trois conteneurs avec 1,88 jours par conteneur 66% du temps et seulement deux conteneurs 34% du temps afin de respecter la contrainte de fréquence de la navette. Cette alternance plutôt que de centraliser les 5 jours de composants dans un seul conteneur permet de réduire les coûts de transport annuels de 4,57\$ à 4,31\$. Cette différence de remplissage du conteneur avec le fournisseur 11 vient du fait que celui-ci provient d'une autre région des États-Unis et par conséquent le transporteur entre l'usine et le *cross-dock* est différent. L'annexe 8 montre que le coût de transport par tonne lorsque la QC est de 1,88 jours est inférieur au coût de transport lorsqu'elle est de 5 jours.

En reprenant le calculateur et en insérant les données pour chaque composant, on obtient les stocks de sécurité suivants :

Fournisseur	Composant	QC	SS
21	211		22
	212	5	17
	213		8,0

Tableau 9.2 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 21

Famille 2 : fournisseur 22 : France

Cette famille est un peu spéciale étant donné que le temps de réapprovisionnement est de 5 jours soit inférieur aux 20 jours d'horizon du planning de production. La demande est connue à l'avance et le stock de sécurité a pour but de se prémunir d'un éventuel problème d'approvisionnement uniquement. Les marchandises commandées correspondent à la séquence des marchandises qui seront assemblées, le mix va donc dépendre directement du planning. Par conséquent, on considère donc les composants comme faisant partie d'un seul type dont la moyenne quotidienne est la somme des demandes individuelles, et dont l'écart-type est nul. Le stock de sécurité optimal est de 1,5 jour et la quantité de commande correspond à la demande pendant 2,7 jours.

Famille 3 : fournisseur 31 : États-Unis

Ces composants sont une nouvelle fois consolidés au même *cross-dock* avant d'être envoyés par bateau vers la Belgique mais contrairement aux composants des fournisseurs 11 et 21, la QC optimale de ces composants est de 13,3 jours soit supérieure au temps qui s'écoule entre deux navettes. Étant donné les très faibles volumes, le stock de sécurité en nombre de jour de couverture de la demande semble très élevé comparé aux autres composants mais cela reste limité en valeur absolue :

Fournisseur	Composant	QC	SS
31	311	13	20
	312		20
	313		0
	314		0
	315		33

Tableau 9.3 : QC et SS optimaux en nombre de jours de couverture de la demande pour les composants du fournisseur 31

Famille 3 : fournisseur 32 : Belgique

Ces composants qui constituent la majeure partie des composants de la famille 3 sont fabriqués au sein même du site de Gosselies. Les coûts de transport sont par conséquent nuls et le temps de réapprovisionnement n'est que de quelques jours au maximum. À l'instar des composants du fournisseur 22, ceux-ci sont également gérés en *pull*. La variabilité de la demande est nulle ainsi que les coûts de transport. On va considérer dans ce cas-ci que la variabilité du temps de réponse est nulle et nous allons inclure la variabilité de la production au sein de la variabilité de la quantité livrée. Avec une quantité de commande correspondant à la demande pendant une journée, le stock de sécurité optimal est de 0,43 jours. Cependant, il est préférable de garder au moins une journée d'inventaire car un problème rencontré en début de journée ne peut parfois être résolu qu'en fin de journée et donc mettre à mal la ligne principale. Cela ne coûterait qu'environ 0,25\$ par an.

Famille 3 : fournisseur 33 : Irlande du Nord

Tout comme les composants du fournisseur 22, ceux-ci ont un temps de réapprovisionnement inférieur à 20 jours. Suivant la même démarche, le stock de sécurité optimal est de 2,5 jours avec une quantité de commande correspondant à 5 jours de couverture de la demande. Les commandes seront donc passées environ une fois par semaine afin qu'elles arrivent deux jours avant le besoin des premiers composants.

Famille 4 : fournisseur 41 : Belgique

Il y a eu de récents problèmes avec la production de ces composants qui aujourd'hui semble toutefois stabilisée. Malheureusement, des informations plus précises quant à la variabilité de cette production n'étaient pas disponibles. Il n'est donc pas possible de calculer avec précision le stock de sécurité optimal. En revanche, nous pouvons dire que l'inventaire actuel de 4 jours semble désormais superflu. En effet, en effectuant la démarche inverse que nous venons d'effectuer pour les autres composants, la variabilité de la production qui justifie un stock de sécurité de 4 jours est de 137%, ce qui contredit complètement le fait que cette production soit stabilisée. Étant donné que le TR de ce fournisseur n'est que de 5 jours et qu'il fait l'objet de nombreuses collaborations avec l'usine, un inventaire de sécurité de 2 jours paraît largement suffisant mais il n'existe aucun chiffre permettant de le justifier.

9.2.3 Compilation des résultats

Le tableau 9.4 compare la situation actuelle et la situation recommandée en termes d'inventaire et de coûts totaux. En effet, la qualité de la proposition ne se mesure pas seulement en termes de réduction d'inventaire et donc de coûts d'inventaire mais également en termes de coûts de transport. Afin de réaliser ces économies en coûts de transport, il a parfois fallu un inventaire cyclique plus important et donc un inventaire moyen plus important.

			Situation actuelle					Situation recommandée					
Famille	Origine	Composant	Jours	Valeur	CI	CT	Total	Jours	Valeur	CI	CT	Total	Économies
1	11	111	18,6	9,26	1,20			10,5	5,21	0,68			5,89
		112	217	6,56	0,85			20,0	0,61	0,08			
		113	15,8	6,23	0,81	11,5	18,2	11,8	4,66	0,61	8,34	12,3	
		114	21,1	19,6	2,55			11,9	11,0	1,44			
		115	11,7	9,69	1,26			10,9	9,03	1,17			
	12	121	7,05	6,39	0,83	0,58	1,41	9,06	8,21	1,07	0,28	1,35	0,06
2	21	211	37,0	1,61	0,21			25,5	1,10	0,14			2,14
		212	233	7,03	0,91	4,93	7,73	19,9	0,60	0,08	3,45	5,58	
		213	9,83	12,9	1,67			11,2	14,7	1,91			
	22	Pull	5,48	8,92	1,16	1,32	2,48	3,34	5,43	0,71	0,41	1,12	1,36
3	31	311	46,7	1,15	0,15			26,4	0,65	0,08			1,49
		312	46,7	0,96	0,12			26,4	0,54	0,07			
		313	533	2,22	0,29	0,63	2,20	6,38	0,03	0,00	0,49	0,71	
		314	600	2,95	0,38			6,38	0,03	0,00			
		315	389	4,79	0,62			39,7	0,49	0,06			
	32	Pull	2,95	9,12	1,19		1,19	1,26	3,22	0,42		0,42	0,77
	33	Pull	15,8	9,80	1,27	1,63	2,90	4,67	2,83	0,37	0,83	1,19	1,71
4	41	Pull	3,44	12,6	1,63		1,63	1,95	7,11	0,92		0,92	0,71
			\$ 132		\$37,7			\$75,5		\$23,6		\$ 14,1	

Tableau 9.4 : Comparaison de la situation actuelle et de la situation recommandée. Les coûts de transport ont été ajustés au volume de production de l'année 2015.

La valeur de l'inventaire passe d'une moyenne de 132\$ sur les trois premiers mois de l'année 2016 à seulement 75,5\$, soit une réduction d'inventaire de plus de 56\$ et une réduction de coûts annuels de 7,31\$. De plus, les coûts de transport chutent de 20,6\$ à 13,8\$, ce qui porte le total des réductions de coûts à 14,1\$. Si l'on convertit ces économies annuelles en valeur actualisée nette (VAN) cela représente une valeur de 108,5\$. Cela signifie que les économies annuelles de 14,1\$ sont équivalentes à une réduction d'inventaire de 108,5\$. En effet, réduire l'inventaire de 108,5\$ permet de faire des économies d'inventaire de 14,1\$. Les résultats obtenus de 108,5\$ sont 5 fois plus importants que l'objectif initial de 20\$.

Il faut cependant attirer l'attention sur le fait que la situation initiale est une moyenne faite sur base de 17 observations en l'espace de 3 mois. Le nombre d'observations étant relativement faible, il ne peut pas être certifié que la situation actuelle corresponde à la vraie moyenne. Il est possible qu'au moment où la plupart des photos ont été prises, des problèmes ponctuels de production ou de livraison aient eu lieu. Cependant, la différence avec la recommandation est si grande que cela ne remet en aucun cas en doute la performance de la solution.

9.2.4 Progressivité de la réduction d'inventaire

Afin de ne pas subir un changement trop brutal qui pourrait s'avérer difficile à mettre en place et lourd de conséquence en cas d'échec, on pourrait conseiller de diminuer progressivement l'inventaire mois après mois pour atteindre l'objectif. Le tableau 9.5 reprend un exemple de dégressivité de l'inventaire.

La stratégie à adopter est de diminuer les premières quantités de commande où le projet est effectif afin de stabiliser l'inventaire à mi-chemin entre la valeur actuelle et l'objectif. Par exemple, il est conseillé, le premier mois, de diminuer la QC de 50% pour le composant 111 ce qui correspond à ne rien commander durant les deux premières semaines. Environ 50 jours plus tard ($m+2$), nous devrions voir l'inventaire atteindre l'objectif intermédiaire de 7,2\$. Durant un mois ou deux, l'entreprise va tester le confort de ce nouvel inventaire. Si l'inventaire est largement suffisant, alors on recommence le processus afin de parvenir à l'objectif final de 5,2\$. Si l'inventaire pose déjà problème à ce moment-là, alors il faut stopper le projet et mener l'enquête afin de comprendre pourquoi cet inventaire ne suffit pas.

Pour certains composants dont le volume de production est faible, il sera nécessaire d'éviter toute commande durant plusieurs mois avant que l'inventaire actuel soit consommé comme les composants 112, 212 ou encore 313.

F	O	C	Valeur	m	m+1	m+2	m+3	m+4	m+5	m+6	m+7	m+8	m+9	m+10	m+11	m+12	m+13	m+14
1	11	111	\$ 9,26	50%	100%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		112	\$ 6,56	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	0%	0%	100%	100%	100%
		113	\$ 6,23	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		114	\$ 19,6	75%	100%	100%	100%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		115	\$ 9,69	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	12	121	\$ 6,39	110%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		211	\$ 1,61	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		212	\$ 7,03	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	75%	100%	100%
		213	\$ 12,9	106%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Pull	\$ 8,92	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	31	311	\$ 1,15	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		312	\$ 0,96	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		313	\$ 2,22	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		314	\$ 2,95	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		315	\$ 4,79	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	32	Pull	\$ 9,12	92%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		33	\$ 9,80	75%	100%	75%	100%	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		41	\$ 12,6	93%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Valeur totale	\$ 132	\$114	\$114	\$103	\$101	\$98,7	\$97,1	\$89,0	\$87,3	\$85,6	\$84,0	\$82,9	\$82,5	\$81,4	\$79,9	\$79,3

Tableau 9.5 : Exemple de réduction progressive de l'inventaire

Pour une meilleure clarté, les changements en termes de QC et de valeur d'inventaire sont indiqués en orange. F signifie famille, O origine, C signifie composant et M constitue le premier mois d'implémentation du projet.

Section 9.3 : Rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le 22

L'analyse de sensibilité nous a montré que le temps de réapprovisionnement mais surtout sa variabilité avait un impact important sur le stock de sécurité. Il est intéressant de se poser la question s'il ne serait pas plus intéressant de déplacer la production de l'entière des composants de la famille 2 vers la France. Le temps de réapprovisionnement passerait de 51 à 5 jours et sa variabilité passerait de 2 à 0,5 jour.

Le stock de sécurité et la quantité de commande optimaux qui en résulteraient sont tous deux égal à 1,52 jours de couverture de la demande des deux types de fournisseurs. Regardons l'impact sur les coûts totaux à l'aide du tableau 9.6.

Famille	Fournisseur	Composant	AVANT					APRES				
			QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
2	21	211			21,9	0,14					0,01	
		212	4,89	1,95	16,8	0,07	4,34				0,01	
		213			7,98	1,69		1,52	0,26	1,52	0,30	0,62
	22	Pull	2,13	0,56	1,52	0,44	0,45				0,38	
			Coûts totaux \$ 7,12					Coûts totaux \$ 1,32				
								Économies annuelles \$ 5,80				
								VAN \$ 19,72				

Tableau 9.6 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22.

La quantité de commande reste identique mais étant donné que le volume est plus grand, le stock cyclique et sa valeur en nombre de jours diminuent. Le stock de sécurité reste lui aussi identique en nombre de jours mais vu que le volume est plus important, ses coûts sont plus importants de 0,26\$. Les coûts de transport passent de 0,45\$ à 0,62\$. Cependant, l'intégralité des coûts du fournisseur 21 disparaît, ce qui représente tout de même plus de 6,24\$. Les économies annuelles seraient donc de 5,80\$.

Ce projet a déjà été envisagé par le département. Les investissements nécessaires pour adapter la ligne de production à ces nouveaux composants qui nécessitent une conception différente des composants du fournisseur 21 ont été estimés à hauteur de 7,37\$ ainsi que 2,28\$ de dépenses annuelles. La valeur actualisée nette du projet (VAN) est alors de :

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = -7,37 + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{5,8 - 2,28}{(1,13)^t} = 19,7\$$$

Le projet est créateur de valeur, il permet d'accroître la valeur de l'entreprise de 19,7\$. Le délai de récupération des investissements est quant à lui de 2,61 années.

Ce qui freine actuellement la mise en place d'un tel projet est la perte de l'exclusivité de la production des MWL XE dont le fournisseur pour la famille 2 est le fournisseur 21. Gosselies est le seul fournisseur mondial des machines dotées d'une motorisation à basse consommation de carburant. Cependant, suivant sa stratégie de haute flexibilité, le groupe Caterpillar souhaite que les usines sœurs de Gosselies aient également la possibilité de produire ce type de machine. Les clients non européens pourraient alors se référer à l'usine qui leur est dédiée et le volume de production des MWL XE de Gosselies serait alors en chute.

Ces machines à basse consommation intéressent en particulier les entreprises européennes et américaines étant donné leur législation de plus en plus sévère en matière d'écologie. Gosselies devrait donc garder une partie significative de ses clients actuels. Nous allons tester 2 cas de figures, le premier avec une demande correspondant à la moitié de la demande actuelle (Tableau 9.7) et dans le second cas de figure une demande correspondant à 25% de la demande actuelle (Tableau 9.8) :

Famille	Fournisseur	Composant	AVANT					APRES				
			QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
2	21	211			43,8	0,14					0,01	
		212	10,5	4,77	33,5	0,07	2,17	1,77	0,39	1,52	0,004	
		213			8,78	1,15					0,16	0,53
	22	Pull	2,13	0,56	1,52	0,44	0,45				0,40	
Coûts totaux \$								Coûts totaux \$				
								Économies annuelles \$				
								VAN \$				

Tableau 9.7 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22 pour une chute de la demande de XE de l'ordre de 50%

Famille	Fournisseur	Composant	AVANT					APRES				
			QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
2	21	211			43,8	0,07					0,003	
		212	7,53	3,26	67,1	0,07	1,18	1,93	0,47	1,52	0,002	
		213			12,8	0,68					0,08	0,49
	22	Pull	2,13	0,56	1,52	0,44	0,45				0,42	
Coûts totaux \$								Coûts totaux \$				
								Économies annuelles \$				
								VAN \$				

Tableau 9.8 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 21 vers le fournisseur 22 pour une chute de la demande de XE de l'ordre de 75%

Le projet reste rentable pour une diminution de la demande de XE jusqu'à 50%. De plus amples investigations devraient être menées afin de déterminer plus précisément l'ampleur de cette chute et confirmer qu'elle soit inférieure à 50%.

Section 9.4 : Transport aérien des composants du fournisseur 33

			AVANT					APRES				
Famille	Fournisseur	Composant	QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
3	33	331			20,4	0,07			6,13	20,4	0,07	
		332			20,4	0,08			6,13	20,4	0,08	
		333	13,26	6,13	0,0	0,00	0,61	13,26	6,13	0,0	0,00	?
		334			0,0	0,00			6,13	0,0	0,00	
		335			31,7	0,06			6,13	0,0	0,01	
			Coûts totaux \$ 0,83					Coûts totaux \$ 0,17				
								CT \$ 0,66				

Tableau 9.9 : Évaluation de la rentabilité du transport aérien des composants du fournisseur 33

On peut également se poser la question de savoir si pour de faibles volumes comme les composants du fournisseur 33, cela ne serait pas plus économique de transporter cette marchandise par avion plutôt que par bateau. En effet, cela permettrait de faire passer le temps de réapprovisionnement de 51 jours à 23 jours seulement ainsi que l'écart-type de 2 à 1. La QC pourrait également être réduite.

Ces changements impliqueraient un gain très minime de 0,05\$ par an. En effet, seul le stock de sécurité du composant 335 est en diminution. Ni le stock de sécurité des autres composants ni le stock cyclique ne change. Les coûts de transport par avion doivent s'élever à un maximum de 0.66\$ par an soit moins de 10% d'augmentation, ce qui semble peu probable pour le transport aérien d'un composant lourd et encombrant, pesant plus de 2,5 tonnes et mesurant plus de trois mètres sur un.

Section 9.5 : Rapatriement des composants du fournisseur 33 vers le 31

			AVANT					APRES				
Famille	Fournisseur	Composant	QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
3	31	PULL	4,95	1,98	1,98	0,31	1,03	4,61	1,81	2,31	0,29	1,11
	33	331	13,3	6,13	20,4	0,07	0,01					
		332			20,4	0,08	0,01					
		333			0,0	0,00	0,002					
		334			0,0	0,00	0,003					
		335			31,7	0,06	0,01					
Coûts totaux \$ 2,18							Coûts totaux \$ 1,43					
							Économies annuelles \$ 0,74					
							VAN \$ 5,73					

Tableau 9.10 : Évaluation de la rentabilité du rapatriement des composants du fournisseur 33 vers le fournisseur 31

Les composants de la famille 3 provenant des fournisseurs 31 et 33 ont quelques caractéristiques communes qui pourraient permettre de centraliser leur production.

Nous allons étudier la possibilité de transférer la production du fournisseur 33 vers le fournisseur 31.

Cela permettrait de diminuer le TR de 51 à 12 jours, de diminuer la variabilité du TR de 2 à 0,75 et par conséquent de diminuer le stock de sécurité mais cela permettrait également de réaliser des économies de coûts de transport.

Les économies annuelles pour un si faible volume des composants du fournisseur 33 s'élèvent à 0,74\$, soit une VAN de 5,73\$. Ces économies semblent insuffisantes en sachant qu'un investissement similaire pour adapter la ligne d'assemblage du fournisseur 22 pour accueillir la production du fournisseur 21 est de 7,37\$.

Section 9.6 : Centralisation de la production des composants de la famille 3

Famille	Fournisseur	Composant	AVANT					APRES				
			QC	SC	SS	CI	CT	QC	SC	SS	CI	CT
3	31	PULL	4,95	1,98	1,98	0,31	1,03	1	0	1	4,35	0
	32	PULL	1	0	1	3,66	0					
	33	331			20,4	0,07						
		332			20,4	0,08						
		333	13,3	6,13	0,0	0,00	0,61					
		334			0,0	0,00						
		335			31,7	0,06						
			Coûts totaux \$ 5,84					Coûts totaux \$ 4,347				
								Économies annuelles \$ 1,49				
								VAN \$ 11,50				

Tableau 9.11 : Évaluation de la rentabilité de la centralisation de la production des composants de la famille 3 vers le fournisseur 31

Bien que la ligne d'assemblage des composants du fournisseur 32 soit différente de la ligne d'assemblage des fournisseurs 31 et 33, il est néanmoins possible d'adapter la ligne d'assemblage du fournisseur 32 afin de pouvoir produire tous les types de composants de la famille 3. Cela permettrait de faire d'importantes économies d'inventaire et de transport.

Le SS optimal est de 0,63 jours mais comme la quantité d'information fait défaut il est recommandé de détenir 1 jour d'inventaire et c'est ce qui a été pris en compte dans le calcul ci-dessus. Les économies annuelles s'élèvent à 1,49\$, soit une VAN de 11,5\$. Une nouvelle fois, aucune estimation de l'investissement requis n'est connue. Mais il apparaît dans ce cas si que les économies sont deux fois plus importantes que pour le projet précédent.

Section 9.7 : Compression des lignes de sous-assemblage

La ligne de sous-assemblage de mariage des composants des familles 1 et 2 est significativement plus performante que la ligne d'assemblage des MWL étant donné qu'elle subit des problèmes de moindre importance et de manière plus occasionnelle. Elle parvient même à atteindre régulièrement sa capacité maximale contrairement à la ligne d'assemblage principale. Cette différence de dimensionnement ou de performance résulte, comme expliqué auparavant, en un surplus de composants mariés entre ces deux lignes. Ce surplus est tel que la ligne de sous-assemblage doit volontairement s'arrêter de nombreuses demi-journées par an. Un redimensionnement de cette ligne est nécessaire afin de devenir plus efficace.

Une des solutions pourrait être la suppression d'un poste et le partage des opérations initialement effectuées sur ce poste entre les autres postes. Passer de 8 postes actuellement à 7 postes en supposant que la charge de travail du 8^{ème} poste serait parfaitement redistribuée aux 7 autres postes impliquerait une production de 96,33% de la production actuelle pour autant que les demi-journées de travail deviennent des journées complètes. Cette ligne, autrefois trop performante, se retrouverait dans une moindre mesure le maillon faible de la chaîne.

Cependant, le fait de ne plus être autant à l'avance peut engendrer une pression sur les opérateurs afin de garder un certain rythme de production et ne pas mettre la ligne principale à l'arrêt. Cette pression était autrefois inexistante et parfois même se matérialisait plutôt par un relâchement étant donné qu'aucun effort n'était nécessaire pour atteindre les objectifs. Cette saine pression pourrait permettre d'accroître la productivité et ainsi atteindre sans problème le volume demandé.

De plus, le temps effectif des opérations par poste est volontairement inférieur au rythme souhaité de production. Par conséquent, un rééquilibrage des différentes opérations entre les postes n'engendrerait pas forcément une diminution dans les proportions qui ont été évoquées.

Faute de temps, une analyse plus détaillée n'a pas pu être faite, néanmoins, ce projet pourrait rapporter l'équivalent d'un salaire d'ouvrier et de 0,43 jour d'inventaire du composant marié, soit une réduction annuelle de respectivement 1,1\$ et 0,38\$ par an.

Une proposition alternative pourrait être, dans la mesure du possible, la fusion de deux postes en gardant la même charge de travail et le nombre d'opérateurs. Cela ne changerait en rien le problème d'accumulation mais cela permettrait de supprimer la marchandise qui se trouvait auparavant sur le poste supprimé et par conséquent de réaliser des économies d'inventaire

Section 9.8 : Diminution du TR du fournisseur 12

Nous pouvons remarquer que le TR du fournisseur 11 et du fournisseur 12 ne diffère que d'une journée, respectivement 51 et 50 jours, alors que le transport par bateau des composants du fournisseur 11 prend 24 jours contre seulement 3 jours pour le transport par camion des composants du fournisseur 12. Cela vient du temps de fabrication laissé au fournisseur qui est de 45 jours en ce qui concerne le fournisseur 12 et de 25 jours en ce qui concerne le fournisseur 11. Si le fournisseur 12 pouvait s'aligner sur le fournisseur 11, cela permettrait de gagner 1,21 jours d'inventaire, soit des économies annuelles de 0,14\$. Il n'y a pas de raisons valables qui peuvent justifier une si grande différence. Gosselies devrait entreprendre des négociations avec ce fournisseur pour aboutir à une réduction de ce temps de réapprovisionnement.

Section 9.9 : Environnement macro-économique

Le nouveau projet de loi sur la réforme du travail insufflé par le gouvernement Michel, et qui pourrait entrer en vigueur le 1^{er} janvier 2017, pourrait s'avérer être une bouffée d'oxygène pour la compétitivité des entreprises belges. En effet, ce projet de loi prévoit l'annualisation du temps de travail ce qui signifie que les travailleurs pourraient travailler jusqu'à 45 heures par semaine pour autant que le cumul annuel ne dépasse pas les 38 heures par semaine en moyenne (Le Soir, 2016). Dans le cas de Caterpillar Gosselies, cela permettrait d'orienter sa main-d'œuvre pour les mois de forte demande. Cette année, les prévisions de la demande pour le second semestre de l'année 2016 sont nettement inférieures à celles du premier semestre. Dans la situation actuelle, Gosselies ne sait pas répondre à toutes les demandes du premier semestre, elle perd donc des ventes et elle doit néanmoins avoir recours au chômage économique pour le dernier semestre. Avec ce projet de loi, elle pourrait satisfaire l'intégralité de la demande sans avoir recours au chômage économique. Ce bol d'air est indispensable pour l'attractivité de la Belgique qui souffre beaucoup de la concurrence de l'Europe de l'est et de l'Asie.

Cette culture de la flexibilité pourrait permettre à l'entreprise de facilement rattraper le retard de production et par conséquent d'avoir moins recours au stock de sécurité. Par exemple, en cas de problème de ligne ou d'approvisionnement, le site pourrait augmenter les heures de travail afin de récupérer son retard en très peu de temps. Le coût d'opportunité d'une demande non satisfaite à temps verrait sa valeur diminuer entraînant également une diminution du stock de sécurité optimal. A leur actuelle, en raison de la contrainte des 38h, le planning est tellement chargé que chaque retard de production se conclut par une vente définitivement perdue.

CHAPITRE 10 : CONTROL

Cette dernière étape du projet a pour but de mettre en place un système d'accompagnement et de contrôle de l'inventaire une fois le projet terminé afin que la performance atteinte perdure au sein de la société et que l'on ne revienne pas à la situation initiale quelques temps après la fin du projet sans savoir que faire pour atteindre de nouveau l'objectif.

La phase de contrôle requiert deux événements : d'une part, la collecte et l'actualisation des données et d'autre part, le suivi des résultats.

Section 10.1 : Actualisation des données

L'entreprise et son environnement étant en perpétuel changement, il est nécessaire de faire un état des lieux régulier afin de vérifier que les solutions qui ont été apportées soient toujours en accord avec la réalité. En effet, la demande peut varier, une marchandise peut en remplacer une autre, l'entreprise peut changer de fournisseur ou celui-ci peut avoir déménagé sa production. Pour toutes ces raisons il est nécessaire d'établir cet état des lieux au moins une fois par an et de procéder à un ajustement immédiat pour les changements prévisibles et les changements les plus importants.

Il est possible d'anticiper ces changements en établissant plusieurs scénarios. Par exemple, un scénario si l'usine tourne à plein régime et un autre si elle n'est qu'à la moitié de sa capacité.

Section 10.2 : Suivi des résultats

Pour différentes raisons, l'inventaire peut revenir à sa valeur initiale et dévier ainsi de l'objectif qui a été fixé. Il est conseillé de consulter une fois par semaine l'état de l'inventaire afin de détecter une telle déviation, d'enquêter pour comprendre d'où vient le problème et de prendre des mesures afin de ramener la valeur à l'objectif. Pour cela, un fichier comprenant deux tableaux a été mis au point. Ce fichier est actualisé chaque jour de manière automatique. Il reprend la liste exhaustive de toute la marchandise présente sur le site de Gosselies et ce pour

les deux types de machines. La démarche de ce mémoire peut donc être réitérée pour l'intégralité de ces marchandises, ce qui donne un potentiel de réduction énorme.

10.2.1 Pareto des potentiels de réduction d'inventaire

Le premier graphique, la figure 10.1, reprend un Pareto des 30 potentiels de réduction les plus importants. Ce potentiel de réduction correspond à la différence entre la valeur actuelle et le maximum autorisé qui, quant à lui, correspond à la somme du stock de sécurité et du stock cyclique diminué de la consommation d'une journée. Il permet de s'orienter en priorité vers les valeurs les plus importantes. Il suffit de sélectionner la date du Pareto que l'on souhaite afficher.

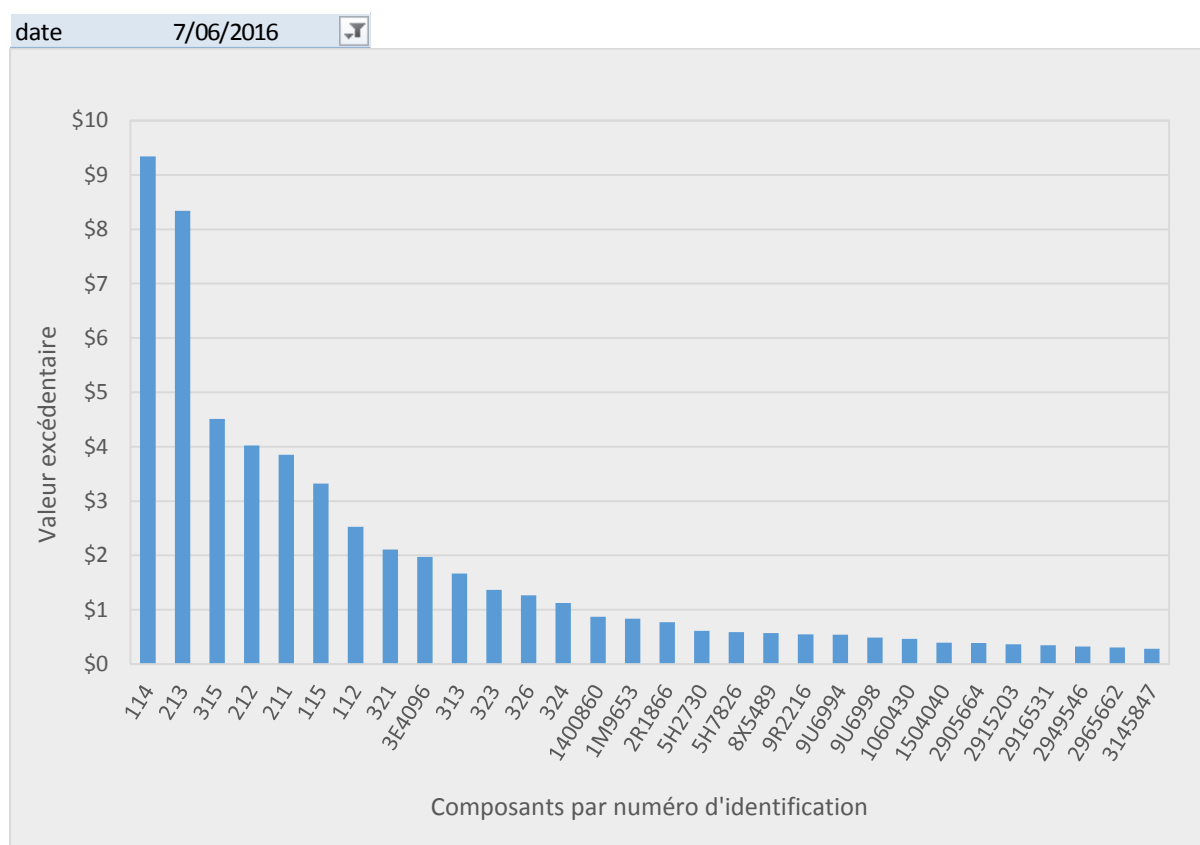


Figure 10.1 : Classement des composants par potentiel de réduction de valeur

Par exemple, nous pouvons constater que les composants 114 et 213 ont chacun une valeur excédentaire respectivement d'au moins 9,34\$ et de 8,34\$. Elle pourrait être plus importante si la date du diagramme de Pareto ne coïncide pas avec une livraison du fournisseur.

10.2.2 Évolution de l'inventaire

Une fois que l'on a repéré les éléments les plus problématiques, il est possible d'afficher leur évolution et de la comparer avec l'objectif grâce à un deuxième graphique. Le deuxième graphique, la figure 10.2, reprend l'évolution de la valeur d'un composant ou d'une combinaison de composants pour les composants qui sont gérés en *pull*. Deux lignes permettent de juger de l'état de l'inventaire. La ligne en pointillé orange reprend le maximum autorisé dont nous venons de parler tandis que la ligne rouge continue reprend le minimum autorisé, à savoir le stock de sécurité. Si l'inventaire se trouve en dehors de ces intervalles, cela signifie qu'il y a un problème et qu'il faut agir afin de le résoudre.

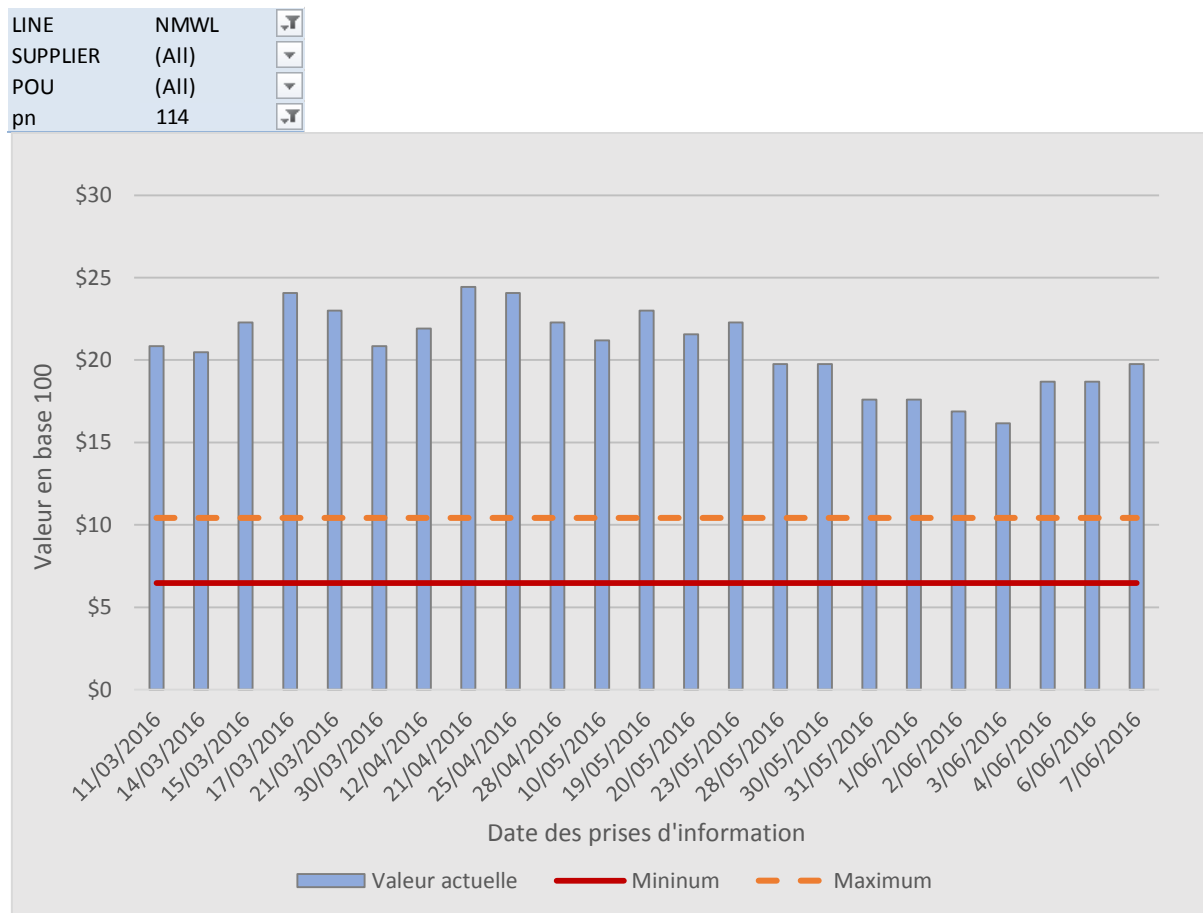


Figure 10.2 : Évolution de la valeur d'un composant en comparaison du minimum et du maximum autorisés

Par exemple, nous pouvons constater sur ce graphique que même si le composant 114 est plutôt stable et même en légère diminution, il reste néanmoins nettement au-dessus du maximum autorisé.

CHAPITRE 11 : RÉSULTATS OBTENUS

Les résultats obtenus sont très satisfaisants. L'objectif, fixé au début du stage par le manager du département OPACC, était une diminution du *pre-POL* financier de 100\$ à 80\$, pour in fine réaliser des économies annuelles de 2,6\$. Pour rappel, Il était plus opportun de considérer un ensemble plus large que cette valeur de *pre-POL*. Cet ensemble représentait un total de 132\$. Après des réductions de 19\$ dans la famille n°1, 8,6\$ dans la famille n°2, 23,2\$ dans la famille n°3 et de 5,45\$ dans la famille n°4, l'inventaire recommandé est de 75,5\$ soit un peu plus de la moitié de la valeur initiale. Cette diminution d'inventaire de 56,3\$ engendre des réductions de coûts d'inventaire de 7,31\$. De plus, la prise en compte de la quantité de commande a permis de faire des économies de frais de transport annuels de l'ordre de 6,81\$. À cela s'ajoutent les gains des projets détaillés lors des sections 9.3, 9.7 et 9.8 qui semblent tous trois à la fois réalisables et rentables, ces gains annuels sont estimés à hauteur de respectivement 2,56\$, 1,48\$, 0,14\$.

Il est à noter que des premiers résultats ont pu être observés. En effet, l'inventaire du mois de juin 2016 de la famille 4 et du fournisseur 22 a sensiblement diminué pour s'établir au niveau de l'objectif fixé. La diminution d'inventaire déjà réalisée s'élève à 9\$.

Le tableau 11.1 compile les différentes économies qui peuvent être réalisées en appliquant les recommandations :

Diminution des coûts d'inventaire	7,31\$/an
Diminution des frais de transport	6,81\$/an
Rapatriement des composants de la famille 3 en France	2,56\$/an
Compression de la ligne de sous-assemblage	1,48\$/an
Diminution TR fournisseur 12	0,14\$/an
Total	18,3\$/an
VAN	140,8\$

Tableau 11.1 : Valeur actualisée nette de l'ensemble des recommandations du chapitre 9

L'ensemble des recommandations du mémoire permettrait ainsi de faire gagner 140,8\$ à l'entreprise. Soit un peu plus de 7 fois l'objectif initial.

En effet, l'entreprise est indifférente entre réaliser 18,3\$ d'économies par an ou recevoir aujourd'hui une somme de 140,8\$ qu'elle va pouvoir investir, notamment en remboursant le capital emprunté à la maison-mère, ce qui va lui permettre d'effectuer 18,3\$ d'économies d'intérêt par an. On peut donc conclure que ces 18,3\$ d'économies annuelles équivalent à une réduction de l'inventaire de 140,8\$.

La méthodologie utilisée et explicitement décrite dans le mémoire peut être répliquée pour d'autres composants qui n'ont pas encore été pris en compte et augmenter considérablement les économies déjà réalisées. En effet, la somme des inventaires de Caterpillar Belgium est de plus de 1000\$.

Section 11.1 : Relativité de la solution optimale

Il faut cependant admettre que le scénario proposé tient compte d'une situation idéale. En effet, dans la situation actuelle, une partie de l'inventaire est ce que l'on appelle couramment du « *Past Due* », c'est-à-dire la quantité d'inventaire correspondant à une demande passée que l'on n'a pas pu satisfaire en temps voulu. Alors que cette demande est reportée, la marchandise correspondant à cette demande est déjà présente sur le site de Gosselies et la marchandise correspondant à la demande future a déjà été commandée en raison d'un temps de réapprovisionnement relativement long. L'entreprise se retrouve alors avec un surplus momentané de marchandises qu'elle tentera d'évacuer par le recours au travail supplémentaire ou en annulant une prochaine commande, dans la mesure du possible.

Il est à noter qu'une partie importante du *past due* actuel vient du fait qu'une quantité trop importante était commandée de manière systématique en comparaison de la capacité maximale de la ligne d'assemblage comme expliqué lors de la section 8.2 et non pas en raison d'un quelconque problème ponctuel.

CHAPITRE 12 : OBSTACLES RENCONTRÉS

Section 12.1 : Manque de coordination

12.1.1 Au sein de Caterpillar Belgium

Caterpillar Belgium fonctionne toujours en silos, chaque département poursuit un objectif qui lui est propre. Par exemple, le département des opérations a pour but de maximiser la disponibilité des marchandises pour éviter un arrêt de la ligne tandis que le département OPACC a pour but de contrôler et de diminuer les coûts de l'entreprise. Ce premier prend unilatéralement des décisions en matière de gestion de l'inventaire sans prendre en compte l'impact sur les coûts qui sont devenus anormalement élevés. D'ailleurs, lorsque le projet a été présenté à une personne de ce département, celle-ci ne voyait pas en quoi l'inventaire actuel constituait un problème. En effet, à travers son regard de gestionnaire des opérations, cette personne percevait l'inventaire d'une manière positive étant donné qu'il permettait de subvenir aux besoins de la ligne en toute circonstance. En poursuivant des objectifs différents de la sorte et en s'obstinant à les remplir à tout prix, les départements se marchent les uns sur les autres et nuisent à l'efficacité de la société. Ils perdent de vue la finalité de l'entreprise qui est de maximiser les profits.

12.2.1 Entre sociétés sœurs

Le problème est encore plus important entre usines sœurs du groupe Caterpillar. En effet, de très nombreux fournisseurs de l'usine de Gosselies font eux aussi partie du groupe Caterpillar. À première vue, on pourrait penser que la communication et la coordination avec une société sœur sont meilleures qu'avec un fournisseur étranger mais ce n'est pas du tout le cas. Celles-ci tentent également de répondre à leurs objectifs et se préoccupent peu de l'impact de leurs décisions sur les autres sociétés sœurs.

Par exemple, nous discutons précédemment du fournisseur 12 qui disposait d'une période ferme de 45 jours ouvrables durant laquelle aucun changement de la part de Gosselies ne peut

être effectué contre 25 jours ouvrables pour le fournisseur 11. Or, ces composants ne sont pas plus difficiles à assembler, il n’y a aucune justification à une différence si grande. Et pourtant, Gosselies doit mener d’intenses négociations afin de tenter de réduire cette période ferme, ce qui lui permettrait de réduire son inventaire moyen.

Les composants du fournisseur 51, qui n’est autre qu’une usine sœur localisée en Pologne, sont un deuxième exemple de ce manque d’intégration. La ligne de production de ce fournisseur n’est pas dimensionnée pour le rythme de production de Gosselies. Dès lors et dès qu’elle le peut, l’usine prend un maximum d’avance afin de ne pas couper l’approvisionnement. Cependant, cette usine ne disposerait pas d’assez de place sur son site pour stocker cette marchandise. Ils envoient donc à l’avance le surplus de marchandises et c’est Gosselies qui doit la détenir et qui subit les coûts y afférents. Il est arrivé, courant du mois de juin 2016, que l’inventaire de ces composants culmine à 9 jours de couverture de la demande pour un objectif actuel de 3 jours et un TR de seulement 12 jours. Si ce fournisseur n’avait pas fait partie de la famille Caterpillar, probablement que Gosselies n’aurait pas accepté la livraison de ces composants.

Section 12.2 : Accès aux données

12.2.1 Vision fragmentée de l’entreprise

En raison de ce fonctionnement en silo, en raison de l’envergure de la société et donc de la parcellisation des tâches, les employés sont très peu au courant de ce que font précisément leurs collègues au jour le jour. Dans ce contexte, la recherche d’information est très difficile. Souvent, il est nécessaire de consulter plusieurs personnes pour obtenir une information complète. La métaphore du puzzle se porte très bien à la situation : chaque personne détient une pièce du puzzle, il faut donc identifier toutes les personnes qui détiennent une pièce et les consulter afin de pouvoir reconstruire le puzzle et comprendre le fonctionnement de l’entreprise dans sa globalité.

12.2.2 Multiplicité et désuétude des systèmes d’information

Cette recherche d’information est rendue d’autant plus difficile par la multiplicité des systèmes d’information. Ceux-ci n’ont guère évolué depuis la création de la filiale en 1965. En effet, peu

de données sont mises en commun et chaque département possède en quelque sorte son propre système d'information. La nécessité d'un système d'information centralisé tel qu'un ERP n'est plus à démontrer, cela permettrait d'éviter de nombreuses pertes de temps à chercher de l'information et dans certains cas d'exécuter la même tâche à plusieurs reprises.

En plus d'être nombreux, ces systèmes anciens sont très rigides. Les nouveaux projets et leurs recommandations doivent impérativement être menés selon les caractéristiques de ces systèmes qui sont incapables de s'adapter. Une des causes de la rigidité de ces systèmes est que les pionniers à leur l'origine, qui autrefois les maîtrisaient, sont partis avec la restructuration de 2013. La gestion des connaissances à ce niveau a probablement été sous-estimée. Aujourd'hui, très peu de personnes connaissent l'outil. La rigidité des systèmes est ancrée dans l'esprit des employés. On m'a dit à plusieurs reprises : « *Le projet est bien mais je ne sais pas comment on va pouvoir l'intégrer dans nos systèmes* ». C'est donc le projet qui doit s'adapter à l'outil alors que c'est bien ce dernier qui n'est plus en adéquation avec la réalité. Cela restreint le champ des possibilités et décourage les employés, ce qui freine en quelque sorte l'innovation qui est indispensable dans ce contexte actuel difficile.

CHAPITRE 13 : RECOMMANDATIONS FINALES

Au-delà de l'application des recommandations en matière de stock de sécurité et de quantité de commande longuement détaillées lors du chapitre 9 ou encore des 3 autres propositions de projet à savoir le transfert de la production de fournisseur 21 vers le fournisseur 22, la compression de la ligne de sous-assemblage et la diminution du TR du fournisseur 12, de nombreuses actions peuvent également être prises afin d'aller encore plus loin.

La plus importante est sans nul doute la collecte des informations qui n'ont pas pu être recueillies afin de diminuer l'incertitude et par conséquent le stock de sécurité. C'est en priorité la variabilité du TR et de la quantité livrée qui doivent faire l'objet d'une collecte de données. En effet, elles ont été grossièrement estimées et de ce fait peuvent différer de manière plus importante de la réalité. Il est également nécessaire de recueillir des informations plus précises quant à la variabilité de la demande qui n'a pas été calculée de manière précise.

D'autres informations sont nécessaires pour l'évaluation de la rentabilité des autres projets mentionnés lors du chapitre 9 : le coût de transport aérien des composants du fournisseur 33, le coût des investissements du transfert de la production du fournisseur 33 vers le fournisseur 31 ou encore les coûts d'investissement de la centralisation de la production des composants de la famille 3 vers le fournisseur 32.

Si les volumes de production des machines utilisant les composants du fournisseur 31 repartent à la hausse, il faudra effectuer de nouveau les calculs présentés dans le chapitre 9. En effet, il pourrait alors devenir intéressant de transporter par avion ces composants ou de transférer la production chez le fournisseur 33.

Il ne faut pas mettre de côté les problèmes de coordination relevés dans le chapitre précédent. Il est nécessaire de faire comprendre à chacun que bien qu'il y ait des objectifs propres à chaque département, il est essentiel de ne pas perdre de vue l'objectif principal

de la société à savoir, la maximisation des profits, qui constitue leur objectif commun (Wieser et al, 2013). Il en résulte que si une action correspond à l'objectif du département mais va à l'encontre de l'objectif principal, c'est-à-dire que cette action va mener, in fine, à une diminution des profits, alors, il ne faut pas effectuer cette action. On parle ici d'objectifs économiques du département et non pas d'objectifs humains comme les conditions de travail qui eux priment sur les objectifs économiques. L'organisation de *team building* inter-départements peut s'avérer intéressante afin de souder les relations entre collègues des différents départements.

Les relations avec les usines sœurs peuvent elles aussi être améliorées. Ce problème comprend exactement la même origine que pour les collaborateurs de Gosselies. Les usines sœurs oublient que Gosselies fait partie du monde Caterpillar et que c'est dans leur intérêt de faire des efforts afin que les résultats de Gosselies soient meilleurs, d'autant plus que cela ne leur coûte rien la plupart du temps. Il pourrait être intéressant d'échanger les collaborateurs de deux usines sœurs ou d'inviter les collègues d'une autre usine sœur à Gosselies afin qu'ils prennent conscience de l'impact de leur décision sur l'activité de Gosselies.

Il est également nécessaire de réserver l'utilisation des prévisions aux seuls cas exceptionnels lorsque des informations précises vont dans ce sens et de se fier dans les autres cas à la consommation moyenne. C'est à ce point qu'entre en jeu le stock de sécurité calculé précédemment.

Nous avons également appris qu'il n'est pas toujours opportun de comparer la gestion des inventaires de deux entreprises. En effet, chaque entreprise possède son propre environnement. Cet environnement définit les paramètres qui vont être utilisés afin de déterminer le stock de sécurité optimal. Comme son nom l'indique, ce stock de sécurité optimal qu'il soit faible ou élevé reste la meilleure solution compte tenu des paramètres et donc de l'environnement de l'entreprise. Il est par conséquent possible qu'une entreprise ayant des inventaires deux fois plus importants que son concurrent possède néanmoins une gestion des inventaires aussi efficace. La comparaison actuelle de l'efficacité des usines sœurs doit tenir compte de la différence entre ces environnements.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Tout au long de ce mémoire, nous avons tenté d'apporter et d'évaluer la performance d'une nouvelle méthode de détermination du stock de sécurité. Nous avons pu observer que cette méthode était très efficace et que l'outil développé était facile d'utilisation. De plus, grâce à cet outil, la méthode est robuste étant donné qu'elle prend en compte les situations pour lesquelles les variables ne suivent pas une distribution normale.

Cependant, afin que cette méthode soit efficace, il est indispensable de disposer de toutes les informations requises, ce qui en fait sa plus grande faiblesse. En effet, nous avons vu lors de la deuxième partie que certaines informations n'étaient pas disponibles. Il est parfois nécessaire de les créer, ce qui demande du temps et de la main-d'œuvre. Lorsque ces informations existent bel et bien, il faut encore savoir où les trouver, d'où l'importance d'un excellent système de gestion de l'information. Lorsque ces informations n'existent pas, il faut les estimer. Le manque d'information nous oblige à rester prudents en surestimant les paramètres dont on a besoin. Le stock de sécurité qui en découle est lui aussi surestimé ce qui fait perdre une certaine efficacité de la méthode. Il est nécessaire que l'entreprise se donne les moyens de mettre en place des processus permettant de récolter ces informations.

Bien que la nouvelle méthode nécessite encore plus d'informations que la méthode la plus répandue actuellement, elle reste néanmoins plus adaptée au monde économique. En effet, le niveau de service moyen préconisé par la méthode est de 99,742% pour les composants du fournisseur 12 soit plus élevé que les 95% ou les 97,5% qui sont habituellement utilisés pour le calcul de la première méthode tandis que le niveau de service moyen des composants du fournisseur 31 dont le volume de production est relativement très faible n'est que de 91,205% soit cette fois-ci inférieur au niveau de service habituellement utilisé avec la première méthode. Si les conséquences d'un inventaire trop important sont déjà dommageables en termes de coûts, les conséquences d'une insuffisance de celui-ci sont, dans des cas comme celui de Caterpillar Belgium SA, catastrophiques. Il est par conséquent indispensable de pouvoir identifier l'optimalité.

BIBLIOGRAPHIE

- Becker, J., Hartmann, W., Bertsch, S., Nywlt, J. & Schmidt, M. (2013). Dynamic safety-stock calculation in *International Science Index, Industrial and Manufacturing Engineering*, 7(10), 2060-2063.
- Bowersox, D. J. & Closs, D. J. (1995). *Logistical management : The integrated supply chain process*. New-York : McGraw Hill.
- Chevalier, P. (2015). LSMS2032 – *Part 7 : Pull systems* [Présentation powerpoint]. Repéré sur : <https://icampus.uclouvain.be/claroline/course/index.php?cid=LSMD20352>.
- Du Camp, M. (1893). *Le crépuscule, propos du soir*. Paris : Librairie Hachette.
- Graham, G. (1987). *Distribution inventory management for the 1990s*. Richardson : Inventory management Press.
- Graves, S. C. (1987). *Safety stocks in manufacturing systems*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- Groleau, Y. (2015). BFI6001 – *Gestion de la liquidité* [Présentation powerpoint]. Repéré sur https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/pcow021?owa_annee_session=20153&owa_sigle=BFI6001&owa_groupe=02.
- Johnson, G., Whittington, R., Scholes, K. & Fréry, F. (2011). *Stratégique*. Villatuerta : Pearson.
- King P. L. (2011). Crack the code : Understanding safety stock and mastering its equations in *APICS magazine*, 21(4), 33-36.
- Le Soir. (2016). *Voici ce que prévoit la réforme du travail de Kris Peeters*. Repéré sur : <http://www.lesoir.be/1200135/article/economie/2016-05-03/voici-ce-que-prevoit-reforme-du-travail-kris-peeters>.
- Meyerson, P. (2012). *Lean supply chain and logistics management*. New-York : McGraw Hill.
- Natarajan, R. & Goyal, S. K. (1994). Safety stocks in JIT environments in *International Journal of Production and Operations Management*, 14(10), 64-71.

- Reynolds, J. I. & Buffa, F. P. (1980). Customer service and safety stock : a clarification in *Transportation Journal*, 19(4), 82-88.
- Sandvig, J. C. (1998). Simple solutions aren't the best ones in *IIE solutions*, 30(12), 28-29.
- Semal, P. (2012). LLSMS2030 – *Company visit at Caterpillar's* [Présentation powerpoint]. Repéré sur : <https://icampus.uclouvain.be/claroline/course/index.php?cid=LLSMD2035>.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E. (2003). *Designing and managing the supply chain : Concepts, strategies and case studies*. Boston : McGraw Hill.
- Statista (2016). *Caterpillar's sales and revenue streams in FY 2015, by segment*. Répéré sur <http://www.statista.com/statistics/281135/sales-and-revenues-of-caterpillar-by-segment/>.
- Pyzdek, T. (2003). *The six sigma handbook*. New-York : McGraw Hill.
- Wieser, P., Perret, F. L. & Jaffeux, C. (2013). *Essentials of logistics & management*. Lausanne : CRC Press.