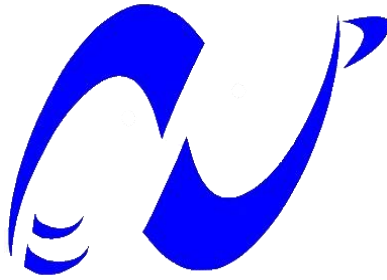


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Industriel

Mémoire de master en Génie Industriel

Option : Management Industriel

Classification des modèles de gestion des stocks de la pièce de rechange intégrant un nouveau modèle d'optimisation

Affaf CHERGUI

Présenté(e) et soutenue publiquement le (15/10/2017)

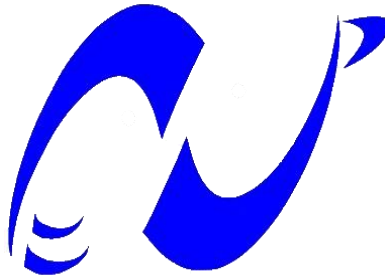
Composition du Jury :

Président	Mr. Redha GOURINE,	MCB	ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mme. Nadjwa BOUKADOUM,	MAA	ENP
Examineur	Mme .Sabiha NAIT KACI,	MAA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Industriel

Mémoire de master en Génie Industriel

Option : Management Industriel

**Classification des modèles de gestion des
stocks de la pièce de rechange intégrant un
nouveau modèle d'optimisation**

Affaf CHERGUI

Présenté(e) et soutenue publiquement le (15/10/2017)

Composition du Jury :

Président	Mr. Redha GOURINE,	MCB	ENP
Rapporteur/ Promoteur	Mme. Nadjwa BOUKADOUM,	MAA	ENP
Examineur	Mme .Sabiha NAIT KACI,	MAA	ENP

ENP 2017

Dédicaces

A mes très chers parents

A mon frère Salim et mon ange adorable Abdennour

A moi-même

A mes amis

Aux membres d'AIESEC Blida

A l'équipe Customer Facing d'Unilever Algérie

Affaf

Remerciements

Louange à Dieu seul, clément et miséricordieux

Tout d'abord, j'adresse mes reconnaissances et vifs remerciements à mon encadreur Mme Nadjoua Noual, qui m'a fortement encouragée à réaliser ce modeste travail qui m'est d'une très chère valeur

Je ne pourrais oublier d'exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur Ayoub OUGRINE pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour sa contribution combien utile et précieuse.

Je saisis cette occasion pour destiner à nos professeurs ayant contribué à notre formation mes remerciements les plus sincères, ainsi qu'aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ce travail.

Que toute personne ayant participé de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire, veuille trouver ici le témoignage de gratitude et de remerciements.

المخلص:

من أجل الظهور والتبرز بين المنافسة المتزايدة في عالم الشركات الصناعية، يعد الاستغلال الأمثل للعمليات الصناعية من أكثر المناهج انتشاراً، من خلال تحسين إحدى الوظائف الرئيسية، وهي صيانة المعدات، وتحديدًا تسيير قطع الغيار.

الهدف من هذا العمل هو تقديم مجلة متعلقة بنهج إدارة تدفقات قطع الغيار وشرح الموقف العلمي لنموذج التحسين الذي تم تطويره في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية: الاستغلال الأمثل، تسيير قطع الغيار، الصيانة الصناعية

Abstract :

Processes optimization is one of the most common strategies implemented today in order to be differentiated in the strong competition that characterize the modern world of enterprises, One of these crucial processes is the maintenance of industrial systems, composed of machines, and consequently, the spare parts management systems.

The present thesis gives a general literature review about the scientific realizations that were developed to model spare parts inventory management, and presents at the end a new model elaborated in this field, with analysis of its parameters.

Key words: optimization, spare parts, industrial maintenance.

Résumé :

En vue de se démarquer de la concurrence accrue qui règne dans le monde des entreprises, l'optimisation des processus industriels représente une des démarches les plus répandues, et ce à travers l'amélioration d'une de leurs fonctions clés, où on retrouve notamment la maintenance des équipements, et plus précisément la gestion de la pièce de rechange.

Le but de ce travail est de fournir une revue de la littérature concernant les approches de gestion des flux de pièces de rechange, et d'exposer par la suite le positionnement scientifique d'un modèle d'optimisation développé dans ce domaine.

Mots Clés : Optimisation, pièces de rechange, maintenance industrielle.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	10
Chapitre 1 : Modèles classiques de gestion des stocks des pièces de rechange.....	12
1.1 Généralités sur la gestion des stocks des pièces de rechange	13
1.1.1 La gestion des stocks	13
1.1.2 Les Pièces de Rechange	13
1.1.3 Processus de gestion des stocks de la PDR	14
1.2 Modèles Basés sur les Politiques d'Approvisionnement	16
1.2.1 La politique du point de commande avec quantité fixe.....	16
1.2.2 Le point de commande avec quantité variable	17
1.2.3 Le re complètement périodique à quantité fixe	17
1.2.4 Le re complètement périodique à quantité variable	17
1.3 Modèles basés sur les prévisions de la demande	19
1.3.2 La moyenne mobile	19
1.3.3 Le lissage exponentiel.....	20
1.3.4 La méthode de régression linéaire	20
1.3.5 La méthode de Croston	20
1.3.6 La méthode de Bootstrap	21
Chapitre 2 : Modèles spécialisés de gestion des stocks de la Pièce de Rechange.....	23
2.1 Généralités sur la maintenance industrielle	24
2.1.1 Définition de la maintenance industrielle.....	24
2.1.2 Types de la maintenance industrielle	24
2.2 Modèles basés sur la loi de dégradation des PDR	25
2.3 Modèle du « Repair man problem ».....	27
2.4 Modèles de la gestion conjointe de la maintenance	29
2.4.1 Modèle sans maintenance préventive.....	29
2.4.2 Modèle avec maintenance préventive	30
Chapitre 3 : Positionnement scientifique d'un nouveau modèle d'optimisation de la gestion des pièces de rechange	34
3.1 Hypothèses et fondements du modèle	35
3.2 Présentation du modèle	35

3.3	Etude de sensibilité du modèle	37
4.3.1	Sensibilité par rapport aux nombre de machines	37
4.3.2	Sensibilité au temps de réparation des PDR	38
4.3.3	Sensibilité au rapport : temps de réparation / la durée minimale entre deux inspections successives	38
4.3.4	Sensibilité par rapport à la nature de la demande.....	38
4.4	Positionnement scientifique du modèle	39
Conclusion générale		41
Bibliographie.....		42

Liste des figures

Figure 1: Typologies des stocks en entreprise	13
Figure 2: Processus opérationnel de la gestion des stocks de pièces de rechange	15
Figure 3: L'évolution du stock suivant la politique de point de commande à quantité fixe	16
Figure 4: L'évolution du stock suivant la politique de point de commande a quantité variable.	17
Figure 5: L'évolution du stock suivant la politique de reemplètement périodique.....	18
Figure 8: Algorithme de détermination du besoin en PDR, dans le cas où le temps de réparation est négligeable.....	27
Figure 9: La chaîne de Markov associée au processus de défaillance et de réparation des composants	28
Figure 10: Fonctionnement d'un cycle de remplacement dans le modèle sans maintenance préventive	29
Figure 11: Fonctionnement du processus de remplacement dans le scénario1	31
Figure 12: Fonctionnement du processus de remplacement dans le cas du scénario 2.....	32
Figure 13: Processus de remplacement dans le cas du scénario 3.....	32
Figure 14: Processus de remplacement dans le cas du scénario 4.....	32

Liste des tableaux

Tableau 1: Typologie des pièces de rechanges	14
Tableau 2 Classification des méthodes de prévisions en fonction des type de demande	22
Tableau 3: Rappel des relations qui existent entre les paramètres de la loi de dégradation..	26
Tableau 4 : Classification des approches utilisées pour la modélisation de la gestion des stocks de la pièce de rechange.	39

Liste des abréviations

PDR : Pièces de Rechange.

GDS : Gestion des Stocks.

Introduction générale

« Le tout est toujours mieux que la somme de ses parties ! »

-Aristote-

Les pièces interchangeables ont bouleversé le monde des entreprises modernes. Avant la rénovation de l'industrie, les produits ont été fabriqués un par un dans des ateliers spécialisés. Après la révolution industrielle et jusqu'à aujourd'hui, la plupart des produits sont assemblés à partir de pièces interchangeables.

Par ailleurs, il semble que la principale raison derrière la poursuite de l'utilisation des pièces interchangeables, au moins pour Thomas Jeyer¹, était de faciliter les opérations de maintenance. Ceci malgré le fait qu'à court terme, la production avec des pièces interchangeables était plus chère car la technologie nécessaire pour les fabriquer n'a pas encore été développée.

Cette innovation de maintenance a également changé les opérations de maintenance. Plutôt qu'effectuer l'entretien ou la réparation de l'équipement dans son intégralité, des pièces d'équipement qui nécessitent une maintenance ou une réparation sont échangés avec des pièces de rechange prêtes à l'emploi. Après cela, l'équipement revient immédiatement en état de fonctionnement, pendant que la réparation et la maintenance est effectuée sur les pièces remplacées. Cette méthode pour maintenir l'équipement augmente considérablement la disponibilité de l'équipement.

De nos jours, cette notion de disponibilité représente un levier clé de la performance des entreprises dans tous les domaines d'activité. Non seulement, parce que les équipements représentent des investissements financiers importants, mais aussi, parce que les conséquences de non disponibilité demeurent de plus en plus dangereuses, d'autant plus que le monde des entreprises est régi par une concurrence accrue.

Ce processus de la maintenance qui fait appel au remplacement des pièces, a immédiatement créé le besoin de mettre en place des systèmes de gestion de ces pièces de rechange. Des systèmes qui font aujourd'hui l'objet de plusieurs travaux de recherche scientifiques, et qui sont également le sujet de la présente thèse.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une problématique d'optimisation de la gestion des flux de la pièce de rechange destinée aux opérations de maintenance. L'objectif principale étant de cadrer le contexte de résolution de ce type de problème, et ce à travers une revue de la littérature sur les différents modèles qui ont été développés dans ce sens, suivie par la proposition d'un modèle d'optimisation et son positionnement scientifique dans ladite littérature.

Pour ce faire, le présent document est organisé en trois chapitres, répartis comme suit :

Chapitre 1 : Présente des généralités et des notions de bases sur la gestion des stocks de la pièce de rechange, et introduit ensuite l'ensemble des modèles classiques utilisés en général dans la gestion des stocks de la pièce de rechange.

¹ Thomas Jeerson (1743-1826) est un père fondateur des Etats Unis d'Amérique, leur troisième président, et un des auteurs principaux de la déclaration de l'indépendance.

Chapitre2 : Donne un aperçu général sur les concepts liés à la maintenance industrielle et met en avant les modèles spécifiques de gestion des stocks de la pièce de rechange qui ont été développés dans une optique d'adaptation au contexte de la maintenance des équipements.

Chapitre3 : contient une présentation détaillée du modèle proposé pour l'optimisation de la gestion des flux de la pièce de rechange, et expose également l'analyse de sensibilité de ce modèle ainsi que son positionnement scientifique par rapport à ceux abordés dans les deux chapitres précédents.

Chapitre 1 : Modèles classiques de gestion des stocks des pièces de rechange

« En gestion, ce que l'on contrôle à outrance nous contrôle et ce
que nous ne gérons pas nous gère »

Sylvain Tourangeau

Dans une entreprise qu'elle que soit son domaine d'activité, le rôle de la fonction maintenance est crucial. Elle regroupe un ensemble d'activités, de stratégies et d'opérations qui ont pour objectif la garantie de la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué. C'est un objectif qui évoque inévitablement la consommation de toutes les fournitures nécessaires aux interventions de la maintenance, où on retrouve majoritairement les pièces de rechange.

La consommation de la pièce de rechange (PDR) constitue en elle-même un autre volet de gestion qui s'avère avoir un rôle crucial dans la performance des processus en entreprise. Dans ce qui suit, nous nous intéressons à la gestion des stocks de la PDR et ces caractéristiques.

1.1 Généralités sur la gestion des stocks des pièces de rechange

1.1.1 La gestion des stocks

La notion de stock désigne l'ensemble des biens possédés par l'entreprise, entreposés dans l'attente d'une utilisation ultérieure dans le cycle d'exploitation.

La marchandise stockée peut être répartie dans des catégories qui diffèrent d'une entreprise à une autre, selon les paramètres de classification choisis, le domaine d'activité et/ou la politique de stockage adoptée. [Roux, 2011].

La répartition des stocks la plus répandue inclut les catégories présentées dans la figure 1.

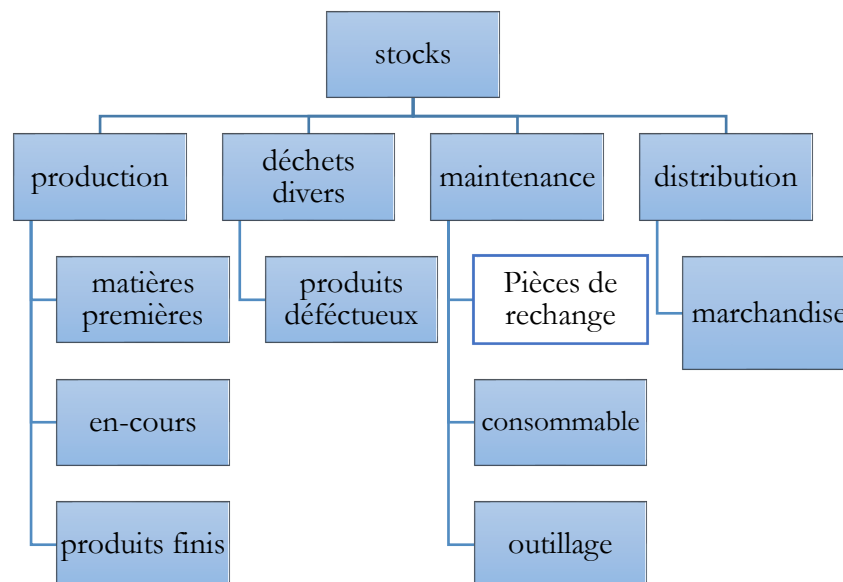


Figure 1: Typologies des stocks en entreprise

1.1.2 Les Pièces de Rechange

Le terme « pièce de rechange », est souvent utilisé pour désigner : un composant élémentaire, un sous-ensemble ou tout un équipement préservé pour servir ultérieurement à remplacer une pièce défectueuse ou dégradée dans un système donné.

Selon la norme française NF X 60-0122, une pièce de rechange est définie comme étant : « un article destiné à remplacer une pièce défaillante ou dégradée sur un bien donné ».

Cette définition implique clairement qu'il s'agit d'un élément clé de la gestion de maintenance, dont la disponibilité affecte directement les performances de l'entreprise.

La classification des pièces de rechange (PDR) peut se faire selon quatre critères, comme le montre le tableau 1 : [Fortuna, 2010] et [Pimor, 2008].

Tableau 1: Typologie des pièces de rechanges

Par destination			
Pièces à remplacement programmé Pièce utilisée dans un remplacement dont le moment d'occurrence est estimé selon la fiabilité souhaitée de la pièce installée.	Pièces à remplacement non programmé Pièces utilisées pour des remplacements dont le moment d'occurrence est aléatoire.	Pièces à remplacement exceptionnel Pièces dont la probabilité d'utilisation est très faible, étant donné que leur durée de vie est au moins égale à celle de l'équipement.	
Par origine			
Pièces d'origine Répondent au cahier des charges constructeur et sont fournies par lui.	Pièces équivalentes Répondent au même cahier des charges que la pièce d'origine, mais non fournies par le constructeur.	Pièces interchangeables Différentes de la pièce d'origine mais elles peuvent accomplir leurs fonctions essentielles.	Pièces adaptables Peuvent se substituer à une pièce d'origine mais après un coût d'adaptation.
Par nature			
Pièces de fonctionnement Subissent des détériorations prévisibles et nécessitent un remplacement périodique.	Pièces d'usure Conçues pour recevoir seules ou en priorité les détériorations prévues.	Pièces de structure Pièces dont la dégradation en usage normal est peu probable.	
Par mode de dégradation			
Pièces subissant une dégradation par l'usure Leur durée de vie suit une loi normale		Pièces subissant une dégradation par surcharge aléatoire Leur durée de vie suit une loi de poisson	

1.1.3 Processus de gestion des stocks de la PDR

Le processus de gestion des stocks de la PDR est un processus de support indispensable pour la maintenance des équipements en entreprise. Du coup, il devient impératif au gestionnaire de la pièce de rechange, de bien cerner le fonctionnement de ce processus. Pour ce faire, il convient d'explicitier les activités clés dont il est composé ainsi que les interactions qui les régissent.

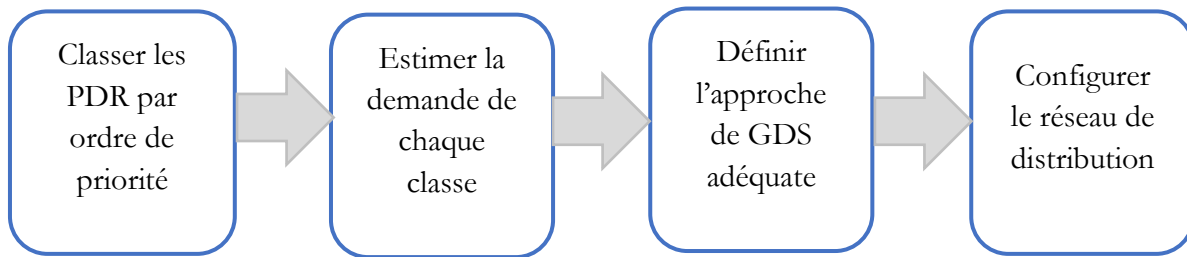


Figure 2: Processus opérationnel de la gestion des stocks de pièces de rechange

➤ **Etape 1 : Classification des PDR**

Il est déraisonnable d'accorder à chacun des articles le même ordre de priorité dans la gestion des flux en stock, à titre d'exemple, la gestion des fournitures de bureau n'est pas similaire à celle des matières destinées à la production.

Cela montre clairement que la gestion des stocks de la PDR est une gestion sélective basée sur la classification des articles selon des critères d'importance, tels que : la disponibilité sur le marché, le coût de réparation et la fréquence de panne, etc. Plusieurs méthodes ont été développées dans ce sens, parmi lesquelles, on retrouve celles citées ci-dessous.

➤ **Etape 2 : Estimation de la demande de chaque catégorie de PDR**

Pour chaque catégorie de la liste établie dans le sous processus précédent, il importe d'estimer la quantité requise sur tout le cycle de vie économique de l'équipement qui les fait intervenir. Pour y arriver, il faut estimer le nombre moyen de remplacements à la panne et, le cas échéant, le nombre moyen de remplacements préventifs.

➤ **Etape 3 : Choisir l'approche de gestion des stocks de la PDR :**

Une approche de gestion de stock consiste à définir l'ensemble de méthodes adoptées pour dimensionner de ce stock dans le temps, et bien optimiser ses stocks commence par choisir un modèle de gestion optimal. Même si leur but est le même, i.e. réduire au minimum la quantité stockée pour diminuer les coûts, tout en assurant une disponibilité maximale, ces modèles diffèrent d'une entreprise à une autre selon le domaine d'activité. Le chapitre 2 du document expose les approches les plus répandues dans la gestion des stocks de la PDR.

➤ **Etape 4 : Configurer le réseau de distribution des PDR**

L'organisation du réseau logistique des pièces de rechange doit permettre de rationaliser les coûts liés aux pièces de rechange (achat, transport, stockage, distribution) tout en assurant le service attendu par les sites utilisateurs. A cet égard, le choix porte sur une des deux configurations :

La mutualisation entre les sites : où l'entreprise opte pour un magasin de stockage et une gestion des stocks centralisés pour tous ses sites d'intervention.

La gestion indépendante : qui consiste à décentraliser la gestion des stocks de la PDR, où chaque site d'intervention a son propre magasin de stockage géré par lui indépendamment des autres sites.

L'optimisation de ce processus représente un levier clé de performance des activités de maintenance. D'une part, la remise en fonctionnement des actifs après défaillance et donc leur disponibilité dépendent directement de la mise à disposition des pièces qui les composent. D'autre part, ces pièces représentent un poste important du budget de maintenance, tant en termes d'achat que des coûts logistiques (transport, stockage, manutention). Il s'agit d'instruire le compromis entre une couverture de stocks élevée mais onéreuse.

1.2 Modèles Basés sur les Politiques d'Approvisionnement

Nous appelons politiques d'approvisionnement classiques, les premières politiques de gestion de stock développées depuis les années 30 principalement dans les travaux de Harris [1915] qui ont conduit au modèle connu universellement sous le terme de « Modèle de Wilson » ou encore « Economic Order Quantity- EOQ ».

Ces politiques assurent la gestion d'un ou plusieurs stocks alimentés par des systèmes d'approvisionnement qui peuvent être composés d'un ensemble d'activités de production, d'assemblage et de transport. L'objectif est de satisfaire la demande du client. A certains moments, des commandes sont passées pour réapprovisionner les stocks. L'intervalle de temps séparant le moment où une commande est passée et la réception des produits est en général appelé délai d'approvisionnement. Cet intervalle correspond, dans la réalité, aux délais engendrés par le lancement de la commande, la fabrication des produits, le transport et la mise en stock.

[Babai, 2005]

Lorsque le contrôle de l'état du stock se fait en continu, on parle alors de politiques à suivi continu, elles sont nommées : les politiques de point de commande. Dans le cas où le contrôle est fait avec des périodes de temps fixes, on parle de politiques à suivi périodique ou encore, les politiques de recomblerent périodique. Dans chacun de ces deux cas, les quantités commandées peuvent être fix ou variable, et donc, en général il existe quatre politiques principales d'approvisionnement classées comme suit :

1.2.1 La politique du point de commande avec quantité fixe

Cette politique est à suivi continu. Elle consiste à commander une quantité fixe Q chaque fois que la position de stock descend en dessous d'un seuil appelé point de commande, et noté r .

La commande est réceptionnée à l'issue du délai d'approvisionnement L . L'évolution du stock suivant cette politique est donnée par la figure 3.

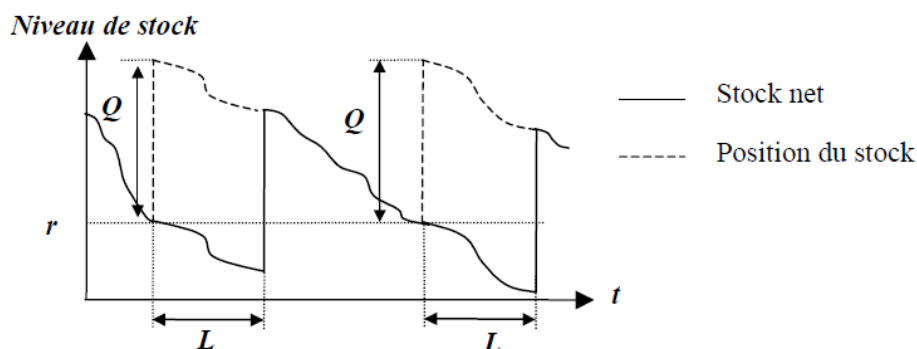


Figure 3: L'évolution du stock suivant la politique de point de commande à quantité fixe

Notons que dans le cas de cette politique, l'instant de passation de commande est variable : si la demande est plus grande que la moyenne, le point de commande sera atteint plus tôt ; si la demande se ralentit, le point de commande sera atteint plus tard. Le stock correspondant au point de commande a pour but de couvrir la demande jusqu'à la réception de la commande. Son niveau est donc au moins égal à la demande pendant le délai d'approvisionnement. **[Babai, 2005]**

1.2.2 Le point de commande avec quantité variable

Dans cette politique à suivi continu, dès que la position du stock descend en dessous du seuil de commande s , on re-complète la position du stock jusqu'à un niveau de reapprovisionnement S . Le seuil de commande s est égal au stock de sécurité (qui est calculé en fonction du taux de satisfaction ciblé et de l'estimation des aléas comme les écarts de prévisions) plus le stock prévu pour couvrir les commandes qui arrivent durant la période d'approvisionnement. Quant au seuil de reapprovisionnement, S il est égal au seuil de commande s plus les quantités prévues pour une consommation régulière durant un intervalle de temps défini.

Contrairement à la première politique où la quantité commandée est fixe, avec cette politique, la commande est de taille variable permettant de répondre à des commandes non régulières. L'évolution du stock suivant cette politique est donnée par la figure 4.

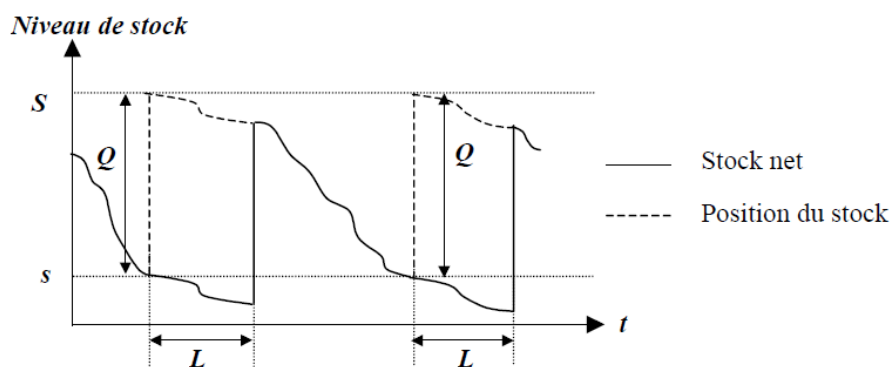


Figure 4: L'évolution du stock suivant la politique de point de commande à quantité variable.

L'inconvénient de cette politique est la complexité de la procédure de détermination des paramètres optimaux s et S . [Babai, 2005]

Clark et Scarf [1960] et Karlin [1960] font partie des premiers à avoir étudié la politique de point de commande à quantité variable. Par ailleurs, Gross et Harris [1971] et Buzacott et Shanthikumar [1993] se sont intéressés également à cette politique, ils l'ont étudié à travers une analyse basée sur la théorie des files d'attente.

1.2.3 Le re complètement périodique à quantité fixe

Elle est également appelée « méthode calendaire » et consiste à commander, à chaque période T une quantité fixe Q indépendamment de la position de stock. C'est une méthode qui est utilisée dans le cas des produits dont la demande ainsi que la consommation sont constantes dans le temps.

1.2.4 Le re complètement périodique à quantité variable

Une méthode de réapprovisionnement dont le but principal est le maintien du niveau des stocks à un seuil optimal prédéterminé. Cette politique est à suivi périodique. Au début de chaque période de longueur T , si la position du stock descend en dessous d'une valeur donnée, appelée niveau de reapprovisionnement et notée s , un ordre de réapprovisionnement est lancé de manière à ramener la position du stock à S . La commande est réceptionnée à l'issue du délai d'approvisionnement L . L'évolution du stock suivant cette politique est donnée par la figure 5.

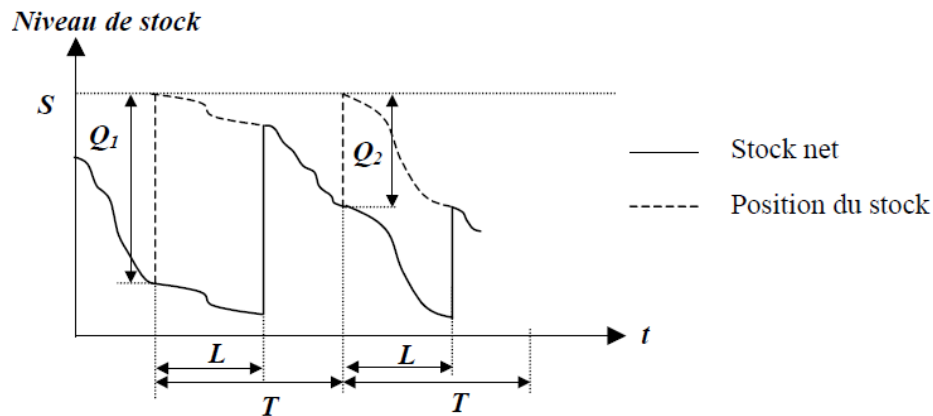


Figure 5: L'évolution du stock suivant la politique de reapprovisionnement périodique.

L'avantage de cette politique par rapport à la politique de point de commande, est qu'elle permet de regrouper les commandes par fournisseur, ce qui peut réduire les coûts de transport et de commande.

Il faut rappeler que la politique de reapprovisionnement périodique présente aussi certains inconvénients. En effet, d'abord cette politique est "aveugle" à l'intérieur d'une période de révision, donc, une variation instantanée de la demande laisse le système insensible (à la différence de la politique de point de commande qui est plus réactive du fait de son suivi continu). De plus, dans certains cas, le reapprovisionnement se fait en petites quantités, c'est à dire qu'à chaque période, si le niveau de stock baisse même très peu en dessous de S , une commande doit être lancée pour atteindre S même si la quantité en question est très petite. [Babai, 2005]

L'étude quantitative des différents paramètres de chacun de ces modèles classiques d'approvisionnement, a fait l'objet des études menées par Harris [1913] et Wilson [1934]. L'objectif principal étant de déterminer la quantité optimale à commander dans chacun de ces cas, de façon à minimiser le coût moyen engendré par toutes les opérations d'approvisionnement et de gestion des stocks.

La politique Kanban en gestion des stocks permet une meilleure coordination entre la consommation et l'approvisionnement. Une conséquence intéressante de ce mécanisme est que le nombre de pièces en stock est limité par le nombre de besoins déclarés. Cependant, la demande pouvant ne pas être immédiatement transmise à toute la chaîne d'approvisionnement, les délais d'approvisionnement peuvent être plus longs que pour les politiques citées auparavant.

De plus, la combinaison entre un ou deux méthodes de celles citées ci-dessus, ainsi que la variation de la nature des paramètres du systèmes en introduisant la notion des comportements aléatoires, ont permis de développer d'autres modèles d'approvisionnement comme par exemple : Le modèle kanban, le modèle à stock minimal, et le modèle de gestion calendaire conditionnelle [Babai, 2005] et [Arda, 2008].

De bons recueils bibliographiques sur les politiques de gestion de stock classiques sont donnés par [Arrow et al, 1958], [Hadley et Whitin, 1963], [Silver et Peterson, 1985], [Zipkin, 2000] et [Axsäter, 2000].

1.3 Modèles basés sur les prévisions de la demande

Durant la dernière décennie, le pilotage de flux basé sur des prévisions de la demande a occupé une place importante dans la littérature. Les méthodes de prévisions exploitent l'historique de la consommation pour en tirer le maximum d'information nécessaire à sa maîtrise sans égard au processus de dégradation du composant. [Diallo, 2006]

L'historique de consommation des pièces de rechange est influencé par plusieurs facteurs dont certains sont intrinsèques et d'autres extrinsèques. Il peut présenter des pics et des creux qui sont parfois saisonniers ou cycliques. Le choix d'un modèle approprié de prévision doit tenir compte de toutes ces particularités qui affectent la précision de la prévision, et qui sont résumées ci-dessous :

- **La fréquence de consommation d'un article** : dans la gestion des stocks, une distinction est faite entre les articles à forte consommation et les articles à faible consommation. Ces derniers sont des articles dont la demande est inférieure à un certain seuil d'unités par cycle d'approvisionnement.
- **Une demande saisonnière de l'article** : c'est une demande dont le niveau consommation est régulièrement, ou encore périodiquement influencé par la saison, elle présente par exemple des pics dans la fin de chaque mois ou durant chaque saison de d'été.
- **Une demande stationnaire ou avec tendance** : La tendance est l'orientation générale d'une série d'observations à la hausse ou à la baisse sur une période assez longue. Lorsqu'il n'existe pas d'orientation, on dit qu'il n'y a pas de tendance. De même si la série présente une orientation plus ou moins stable on dit que la demande est stationnaire.
- **Une demande intermittente** : c'est une demande aléatoire avec une grande proportion de valeurs nulles, elle présente souvent une grande variabilité entre les valeurs non nulles.

Ces caractéristiques de la demande sont étroitement liées à la nature du taux de panne de la pièce comme le montre la figure suivante :

Dans la littérature, les méthodes de prévisions que nous allons aborder dans cette section, sont souvent étudiées dans une branche de mathématiques appelée : les séries chronologiques ou encore les séries temporelles. Elles ont fait leur première apparition dans les écrits scientifiques liés à l'économie au XVIII^e siècle.

Pour estimer la demande en PDR, plusieurs méthodes de prévisions ont été développées. Elles diffèrent par rapport à leur principe de calcul et le type de données caractérisant l'historique qu'elles traitent. Avant de les présenter, il convient d'introduire la notation suivante :

- L'historique des consommations est composé de **n** observation ordonnées chronologiquement de **1** à **n**.
- y_i : l'observation i de l'historique disponible
- \hat{y}_i : la valeur estimée de l'élément i .

Dans le cas des PDR, les méthodes de prévisions utilisées peuvent être résumées dans la liste suivante :

1.3.2 La moyenne mobile

Une méthode d'estimation qui considère que la valeur estimée est égale à la moyenne des k dernières observations enregistrées dans l'historique. On parle alors d'une moyenne mobile d'ordre k .

$$\hat{y}_{n+1} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} y_i$$

Cette formule accorde le même ordre d'importance à toutes les k dernières observations. Par ailleurs, on peut avoir une pondération différente pour chacune de ces observations, c'est le principe de la méthode de la moyenne mobile pondérée, présentée par la formule suivante [Diallo, 2006]

$$\hat{y}_{n+1} = \sum_{i=1}^{i=k} \omega_i y_i \quad \text{Avec } 0 \leq \omega_i \leq 1 \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^{i=k} \omega_i = 1$$

1.3.3 Le lissage exponentiel

Une méthode qui permet d'effectuer une prévision en accordant plus d'importance aux données récentes. Les poids diminuent d'une manière exponentielle relativement à l'âge des données. Pour la même notation, la formule d'un lissage exponentiel simple est donnée par la relation suivante :

$$\hat{y}_{n+1} = \alpha y_n + (1 - \alpha)\hat{y}_n$$

Le lissage exponentiel simple est une méthode adaptée aux demandes stationnaire non saisonnières. Cependant, plusieurs variantes de ce modèle existent pour pallier aux demandes avec tendance et/ou avec saisonnalité, il s'agit respectivement du lissage exponentiel de Holt et le lissage exponentiel de Holt & Winter [Diallo, 2006].

1.3.4 La méthode de régression linéaire

Le principe de cette méthode est de modéliser l'évolution de l'historique en fonction du temps, c'est-à-dire trouver l'équation qui régit la relation entre les y_t et t . Cette équation est donc de la forme :

$$y_t = g(t, \theta) + \epsilon_t$$

Où :

- g est une fonction déterministe connu dans le temps
- $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r)$ est un paramètre vectoriel de la fonction g .
- $\epsilon = \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ est un vecteur dont les composantes sont des variables aléatoires représentant l'erreur de l'estimation.

Dans le cas où g est linéaire en fonction de t , on parle alors de la régression linéaire des observations. L'estimation de $n+1$ est donnée dans ce cas par la formule :

$$\hat{y}_{n+1} = \alpha (n + 1) + \beta + \epsilon_{n+1}$$

α et β Sont les paramètres de la régression calculés par la méthode des moindres carrés. [Diallo, 2006]

1.3.5 La méthode de Croston

Les méthodes de prévisions présentées en haut sont limitées dans le cas d'une consommation de PDR intermittente². En effet, le lissage exponentiel donne plus de poids aux données non nulles, ce qui induit en erreur une prévision d'une demande non nulle en la ramenant aux alentours des périodes des dernières consommations enregistrées. Pour pallier à cette insuffisance, Croston a

² D'après les travaux de [Ghobbar and Friend, 2003], une analyse a été menée sur 13 méthodes de prévision (y compris celles citées en haut) dans le cas d'une demande intermittente des pièces de rechange d'un avion, et aucune d'elles n'a satisfait le taux de service souhaité, à l'exception de la méthode de Croston

développé un modèle [**Croston, 1972**] permettant d'appliquer séparément le lissage exponentiel à la taille des demandes et à l'intervalle inter-demande. [**Diallo, 2006**].

La méthode ne prend en considération que les périodes avec demande non-nulle, elle est déroulée selon l'algorithme suivant :

Soit :

- y_t : la demande d'un article à la période t ;
- I : intervalle de temps depuis la dernière consommation ;
- P_t : estimateur de Croston de l'intervalle moyen entre deux consommations non nulles.
- Z_t : estimateur de Croston de la valeur moyenne des consommations ;
- y'_t : estimateur de Croston de la demande moyenne par période ;
- α : paramètre.

La valeur du paramètre α peut être la même pour les deux lissages exponentiels, comme elle peut être différente.

Algorithme :

```

Si  $Y_t = 0$ ,
     $P_t = P_{t-1}$ 
     $Z_t = Z_{t-1}$ 
     $I = I + 1$ 
Sinon,
     $P_t = (P_{t-1}) + \alpha (I - P_{t-1})$ 
     $Z_t = (Z_{t-1}) + \alpha (Y_t - Z_{t-1})$ 
     $I = 1$ 
Fin Si
 $y'_t = Z_t/P_t$ 

```

Ce modèle initial de Croston, a fait le sujet des travaux de Syntetos et Boylan [2001] qui ont pointé quelques limites dans son utilisation, et ont proposé par la suite une correction sous le nom : le modèle SBA (Syntetos-Boylan Approximation).

1.3.6 La méthode de Bootstrap

Introduite par Efron (1979), c'est une méthode d'estimation non paramétrique [**Gamero et al, 1998**], basée sur le rééchantillonnage, qui consiste à faire de l'inférence statistique sur de nouveaux échantillons tirés à partir d'un échantillon initial. Disposant d'une sous-population réduite destinée à donner une certaine information sur la population générale, on tire au sort une nouvelle sous-population réduite de la même taille. Ce processus est répété K fois où K est très grand.

Dans le cas de la prévision d'une demande intermittente, cette méthode prélève aléatoirement des valeurs de l'historique des demandes non-nulles et les affecte aux périodes où des demandes non-nulles sont prévues. C'est une méthode qui a démontré une grande force dans l'estimation de la demande des PDR d'après les travaux de Bookbinder et Lordahl [1989] ainsi que ceux de Wang et Rao [1992].

Pour la demande intermittente, plusieurs chercheurs se sont basés sur la méthode Bootstrap pour développer d'autres méthodes destinées spécialement à l'estimation de ce type de demande, où on retrouve notamment les travaux de Snyder [2002] et Willemain et al [2004].

Quelle méthode choisir ?

Il est important de bien définir le type de la demande pour pouvoir choisir le modèle de prévision approprié. Le tableau 2 associe les méthodes de prévisions les plus utilisées pour chaque type de demande [Diallo, 2006]

Tableau 2 Classification des méthodes de prévisions en fonction des type de demande

Type de la demande		Méthode de prévision
PDR à forte consommation	Stationnaire (taux de panne constant) et sans saisonnalité	<ul style="list-style-type: none"> • Moyenne Mobile Simple • Moyenne Mobile Pondérée • Lissage exponentiel simple
	Avec tendance (taux de panne variable) et sans saisonnalité	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage exponentiel de Holt • Régression Linéaire
	Saisonnnière	<ul style="list-style-type: none"> • Lissage exponentiel de Holt & winters
PDR à faible consommation	Non intermittente	<ul style="list-style-type: none"> • Moyenne Mobile • Lissage exponentiel Simple
	Intermittente	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de Croston • Méthode du « Bootstrap »

La liste des méthodes de prévision de la demande, abordée dans cette partie est loin d'être exhaustive, cependant, elle représente une référence fondamentale pour les travaux de recherche élaborés dans ce sens. En effet, il existe une multitude d'autres méthodes que nous n'avons pas vu dans ce document, mais qui sont principalement développées sur la base de celles que nous avons expliquées.

Conclusion

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, les modèles que nous avons vus à ce niveau de l'étude sont des modèles généraux applicables sur la gestion des stocks ordinaires. Cependant, plusieurs travaux scientifiques ont été orientés vers le développement d'autres types de modèles destinés exclusivement à la gestion des stocks de la pièce de rechange.

Chapitre 2 : Modèles spécialisés de gestion des stocks de la Pièce de Rechange

« Quand souffle le vent du changement, certains construisent des murs,
d'autres des moulins »

Proverbe Chinois

Le présent chapitre met l'accent sur trois grandes catégories des modèles de gestion des stocks de la pièce de rechange, qui ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, dans un souci d'une adaptation maximale au contexte imposé par la fonction de maintenance industrielle. C'est pourquoi, nous allons commencer dans un premier temps par des généralités sur la maintenance industrielle permettant la compréhension des différentes démarches adoptées dans les modèles qui seront exposés par la suite.

2.1 Généralités sur la maintenance industrielle

2.1.1 Définition de la maintenance industrielle

L'Association Française de la Normalisation [AFNOR] définit la maintenance industrielle dans sa norme NF- X 60-010 comme étant : « l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à **le maintenir**, ou à le **rétablir** dans un **état spécifié** dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». Dans un contexte industriel, on met le point sur trois notions importantes introduites par cette définition :

- **Maintenir** qui évoque un suivi et une surveillance du bien.
- **Rétablir** qui sous-entend une intervention sur le bien pour correction et réparation.
- **Etat spécifié** qui suscite la définition des objectifs de cette intervention et le niveau de compétence qu'elle requiert.

En plus de ces notions, la définition de la maintenance industrielle introduit aujourd'hui une quatrième notion imposée par l'intensité croissante de la concurrence, il s'agit **de la maîtrise des coûts**. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter

2.1.2 Types de la maintenance industrielle

Les actions de la maintenance peuvent être classées en fonction de leurs finalités, de leurs résultats et des moyens techniques d'intervention qu'elles utilisent. Trois catégories majeures ont été définies selon leur apparition au fil du temps [ISO 9001 version 2008] :

➤ La Maintenance Corrective

Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l'apparition d'une défaillance sur un équipement donné. Ces opérations interprètent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification et le contrôle à la fin du bon fonctionnement.

Le dépannage caractérise un type de maintenance corrective : c'est la Maintenance Palliative ou la réparation est provisoire. Un autre type de Maintenance corrective : c'est la Maintenance Curative qui est caractérisée par une réparation parfaite (définitive) c'est-à-dire, la remise de l'élément défaillant en état de fonctionnement avec les spécifications d'origine.

Le but est d'éviter éventuellement la réapparition de la même défaillance est d'assurer par une action de contrôle destinée à vérifier le bon fonctionnement des dépannages et réparations. Un retour d'expérience (réalise par la mémorisation les historiques des pannes et l'ensemble de leurs actions de maintenance associées) assure l'amélioration des interventions ultérieures.

➤ La Maintenance Préventive

Elle regroupe les activités réalisées selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation du service rendu. Ce type de maintenance se subdivise à son tour en trois sous-types :

Maintenance Conditionnelle : Elle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, exercée au cours des visites préventives. Ces visites permettent de mesurer des paramètres significatifs et de déclencher l'opération de maintenance si la mesure enregistrée atteint un seuil prédéfini.

Maintenance Prévisionnelle : C'est une maintenance conditionnelle, mais qui est exécutée sur l'évolution des mesures enregistrées et non pas sur leurs valeurs ponctuelles, elle se fait suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien.

Maintenance Systématique : Elle se traduit par l'exécution sur un équipement à dates planifiées, ou à volume prédéfini d'unités d'usage atteint, d'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale. Une démarche systématique suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et sa vitesse de dégradation. Elle se pratique dans le cas où une sécurité de bon fonctionnement quasi absolue est souhaitée, en remplaçant suffisamment tôt, les pièces ou organes victimes d'usure ou de dégradation.

➤ La Maintenance Améliorative

Elle répond à des besoins d'évolution où il convient d'apporter certaines modifications suite à des situations nouvelles, à des obligations ou à des objectifs nouveaux. L'équipement subit donc des activités de maintenance de type : rénovation, reconstruction et modernisation.

2.2 Modèles basés sur la loi de dégradation des PDR

Dans le cas où la consommation de la PDR est aléatoirement distribuée sur l'horizon d'exploitation, une approche probabiliste est donc adoptée pour l'estimer, en utilisant les caractéristiques des lois usuelles de distribution aléatoire, dont le comportement est connu. Cette démarche consiste à comprendre le comportement de la consommation pour l'aligner avec une de ces lois. Ce comportement est en général, régi par la loi de dégradation de la PDR. [Diallo,2006]

La loi de dégradation d'un composant est une caractéristique qui permettra, entre autres, d'évaluer le risque de sa défaillance, d'estimer le nombre de défaillances sur un intervalle de temps donné, en tenant compte de la stratégie de maintenance en vigueur (taux de service souhaité).

Les historiques de pannes sont exploités pour établir la loi de dégradation du composant en fonction de son profil de mission. En l'absence d'historique de pannes et des consommations, on se basera sur les recommandations du fournisseur et éventuellement sur l'avis d'experts (méthode Delphi ou autres). Des historiques de consommation de composants similaires peuvent être aussi considérés pour obtenir un estimé vraisemblable.

La définition d'une loi de dégradation consiste à déterminer un de ses paramètres cités dessous :

R(t) : La fiabilité du composant, égale à la probabilité que ce composant puisse accomplir ses fonctions requises sur une durée de fonctionnement allant de 0 à t. sur un intervalle de temps, R(t) est nommée fonction de survie du composant.

F(t) : La mortalité du composant, égale à la probabilité que ce composant tombe en panne au moins une fois sur une durée de fonctionnement allant de de 0 à t. Sur un intervalle de temps donné, F(t) est nommée la fonction de défaillance.

f(t) : La densité de défaillance, représente le taux de variation de la fonction de mortalité F(t). Si on pose Δt une variation élémentaire de temps, alors, $f(t) \cdot \Delta t$ est la probabilité d'avoir une défaillance dans l'intervalle $]t ; t + \Delta t]$.

$\lambda(t)$: Le taux de défaillance : représente l'opposé du taux de défaillance relatif f(t). Si on pose Δt une variation élémentaire de temps, alors, $\lambda(t) \cdot \Delta t$ est la probabilité, si le système est encore en service à l'instant t, de connaître une défaillance dans l'intervalle $]t ; t + \Delta t]$

La connaissance d'un des quatre paramètres permet d'obtenir les trois autres. Le tableau 3 rappelle les relations qui existent entre les différentes grandeurs.

L'estimation du besoin en PDR sur un horizon d'exploitation donné, peut être effectuée grâce à la définition de loi de dégradation. Pour ce faire, un nouveau paramètre va être introduit, en fonction de ces quatre grandeurs. Il s'agit du nombre moyen de remplacements à la panne par un composant neuf, noté **M(t)**. [Diallo, 2006]

Tableau 3: Rappel des relations qui existent entre les paramètres de la loi de dégradation..

	f(t)	F(t)	R(t)	$\lambda(t)$
f(t)	-	$\int_0^t f(x) dx$	$\int_t^\infty f(x) dx$	$\frac{f(t)}{\int_t^\infty f(x) dx}$
F(t)	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	1- F(t)	$\frac{dF(t)}{[1 - F(t)] dt}$
R(t)	$-\frac{dR(t)}{dt}$	1-R(t)	-	$-\frac{dR(t)}{R(t) dt}$
$\lambda(t)$	$\lambda(t) * e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	$e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$	-

Dans le cas où le temps de réparation est négligé, le nombre moyen de remplacements vérifie l'équation suivante sur un intervalle de longueur t.

$$M(t) = F(t) + \int_0^t M(t-x) f(x) dx$$

Il est à noter que l'expression analytique de M(t) n'est connue que pour les cas où la fonction de fiabilité suit une loi exponentielle ou de Gamma d'ordre 2. Pour des distributions quelconques de

durées de vie et de réparation, une procédure numérique de calcul de $M(t)$ est proposée par les chercheurs.

Pour un nombre de PDR donné n sur un horizon t défini, l'équation $\mathbf{M}(t) = n$ permet de calculer $R(t,n)$: le taux de fiabilité assuré avec ces n composants de rechange.

Il en résulte alors que le nombre optimal de PDR à mettre en stock est égal au plus petit entier n^* qui permet d'obtenir un taux $R(t,n^*)$ supérieur ou égale au taux de fiabilité R^* exigé par la stratégie de maintenance de l'entreprise. Ce dernier, représente le seuil minimal de probabilité de fonctionnement que les équipements doivent assurer sur t unités de temps et avec n^* pièces de rechange.

Cet algorithme peut être présenté comme illustré dans la figure 8 :

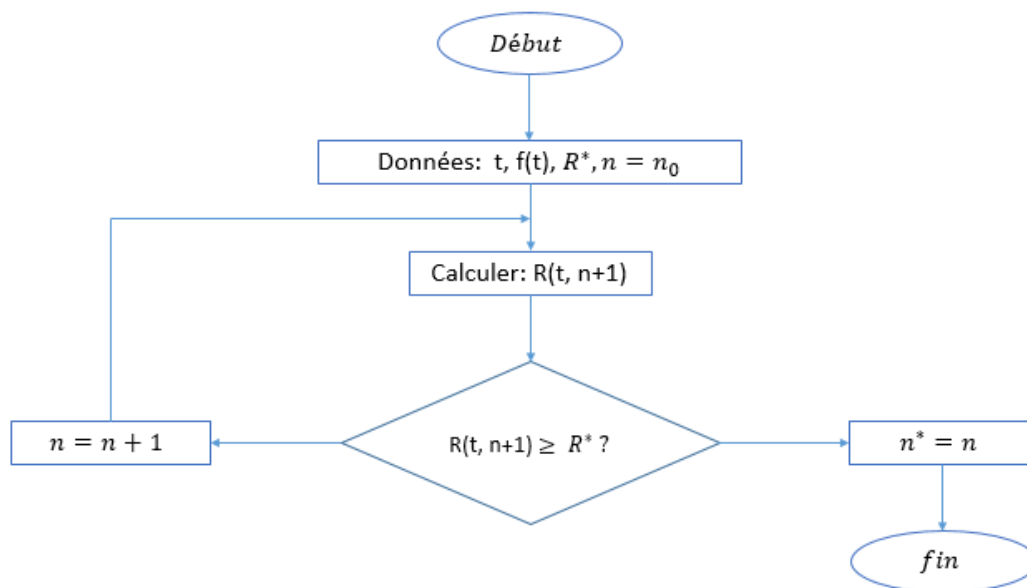


Figure 6: Algorithme de détermination du besoin en PDR, dans le cas où le temps de réparation est négligeable.

C'est un algorithme qui peut être aisément programmé pour déterminer le besoin en PDR, dans le cas où le temps de réparation est négligeable. [Diallo, 2006]

2.3 Modèle du « Repair man problem »

Toutefois, le temps de réparation peut souvent s'avérer important, et donc l'expression du nombre de renouvellements devient encore plus compliquée. De plus, cette philosophie traite le cas individuel, étant donné qu'elle s'intéresse à un seul équipement où la PDR peut être installée, alors qu'il est plus intéressant de traiter le cas de l'interchangeabilité des PDR dans un système de plusieurs machines.

Le « Repairman Problem » est un modèle qui a été développé dans ce sens. Il aborde le problème sous forme d'un parc de N équipements avec un atelier de réparation de capacité C et un magasin de stockage qui contient Y composants de PDR.

Les composants stockés ainsi que ceux installés sur les équipements ont la même loi de dégradation. A cette dernière, il convient de rajouter un cinquième paramètre relatif au processus de réparation, il s'agit du taux de réparation noté : $\mu(t)$.

Lorsqu'un composant tombe en panne, il est remplacé par un composant de rechange si celui-ci est disponible en stock. Le composant défaillant est acheminé vers l'atelier de réparation où il est parfaitement remis en état, inspecté et remis dans le stock de pièces de rechange qui est contraint de ne pas être nul dans une certaine proportion qui satisfait le niveau de service R^* exigé par l'entreprise. Ce dernier est équivalent au seuil minimal de probabilité de bon fonctionnement que le système doit assurer.

C'est à Taylor et Jackson [1954] que l'on doit l'une des premières applications de la théorie des files d'attente à la résolution du problème d'approvisionnement en pièces de rechange.

Deux tendances de résolution du problème coexistent. La première tendance suppose que les capacités des stations de réparation sont suffisantes et donc qu'il n'y a pas de phénomènes d'attente : c'est l'hypothèse dite du « ample server ».

C'est l'hypothèse de base des modèles Metric, Vari-Metric, et Dyna-Metric. Le modèle METRIC (Multi-echelon technique for recoverable item control) proposé par Sherbrooke traite du cas de plusieurs parcs-machines (bases) reliés à un atelier central de réparation (dépôt).

Du fait que le modèle multi-échelon est plus complexe, les travaux de cette tendance supposent que les capacités de réparation sont infinies et qu'il n'y a pas de phénomène d'attente : permettant l'optimisation des stocks dans les bases et le dépôt central. Les hypothèses de modélisation posées conduisent à des stocks inférieurs à ceux qu'il faudrait en réalité pour atteindre le niveau de service spécifié. Le principal avantage présenté par les modèles de la première tendance est leur capacité à traiter relativement facilement des problèmes multi-échelons. Ce qui n'est pas le cas des modèles de la deuxième tendance qui sont complexes à résoudre même dans les cas à un seul échelon. La difficulté vient de la prise en compte des phénomènes d'attente qui peuvent survenir puisque les stations de réparation n'ont pas des capacités infinies. Les modèles obtenus sont plus complexes et requièrent plus d'efforts de résolution.

Dans cette section, nous abordons le problème simple de la détermination des quantités de PDR requises dans une organisation qui dispose d'un magasin de stockage et d'un atelier de réparation comptant c réparateurs. La chaîne de Markov associée au processus de défaillance et de réparation des composants est donnée par la figure 9.

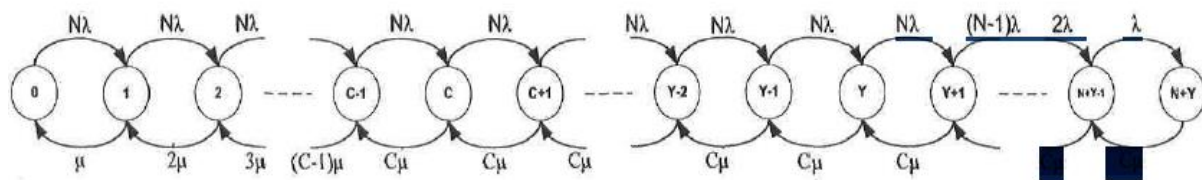


Figure 7: La chaîne de Markov associée au processus de défaillance et de réparation des composants

Un tel type de processus introduit deux notions de probabilités :

P_i : la probabilité, en régime permanent, que i machines hors d'usage soient en attente ou en cours de réparation. Pour un $\lambda(t)$ et un $\mu(t)$ constants, cette probabilité peut être calculée pour chaque i allant de 0 à N , en fonction de λ , μ , N , y et C .

Q_i : la probabilité en régime permanent, que i machines hors d'usage soient dans l'atelier sachant qu'une panne est sur le point d'arriver. Le nombre de machines étant fini, cette probabilité conditionnelle est donnée en fonction de P_i par une relation nommée de Gauss.

Le nombre Y de machines à garder en stock doit permettre d'assurer un certain niveau R^* de satisfaction des demandes de pièces de rechange, et donc il vérifie la relation :

$$\sum_{i=0}^{Y-1} Q_i \leq R^*$$

C'est à partir de cette relation que le nombre de PDR en stock est déterminé dans le cas d'un processus de panne et de réparation markovien. [Diallo, 2006]

2.4 Modèles de la gestion conjointe de la maintenance

En s'intéressant à un approvisionnement unitaire, cette approche est utilisée pour des articles encombrants ou dont les coûts d'acquisition, de stockage et de pénurie sont élevés et dont le délai de réapprovisionnement est beaucoup plus court que l'intervalle entre deux pannes qui s'étend sur plusieurs mois ou semestres. Une des questions qui se pose pour un tel composant est de savoir à quel moment la commande doit être placée sachant que, si elle est trop tardive, il y a un risque de pénurie et si elle est trop anticipée, il y a un risque lié à la possession (coût de stockage, obsolescence, détérioration, vol, etc.). Pour trouver un compromis entre ces deux situations extrêmes, deux modèles ont été développés, le premier est un modèle de base qui s'intéresse uniquement à la maintenance curative, alors que le deuxième projette la problématique sur un plan de maintenance préventive. [Diallo, 2006]

2.4.1 Modèle sans maintenance préventive

On considère un composant ayant fonctionné sans panne pendant t unités de temps. A quel instant optimal W^* ($W > t$) doit-on passer la commande pour espérer obtenir un coût total d'opération minimal, sachant que :

- L : délai d'approvisionnement du composant de rechange.
- h : coût horaire unitaire d'entreposage.
- π : coût horaire unitaire de pénurie.

La figure 10 illustre le fonctionnement d'un cycle de remplacement :

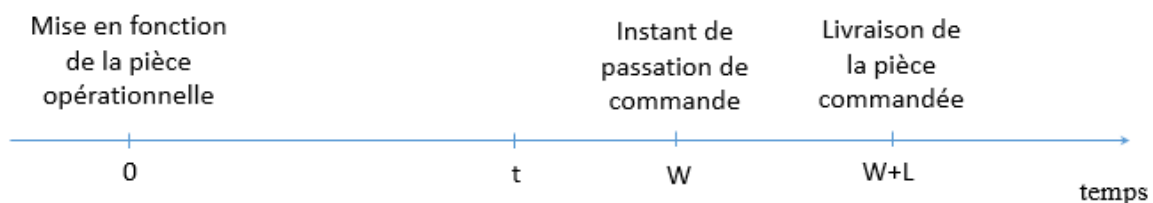


Figure 8: Fonctionnement d'un cycle de remplacement dans le modèle sans maintenance préventive

Le coût total moyen $CT(W)$ est la somme du coût de stockage $CS(W)$ de la PDR et du coût de pénurie $CP(W)$ advenant une panne avant la livraison de la pièce de rechange.

La probabilité de pénurie est égale à la probabilité de défaillance entre t et $W+L$ sachant que le composant était en vie à t . Cette probabilité est donnée par :

$$\text{proba de pénurie} = \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx$$

Le coût de pénurie vaut donc :

$$CP(w) = \pi \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx$$

La période de stockage commence avec la livraison de la PDR et se poursuit tant et aussi longtemps qu'il n'y a pas de panne du composant opérationnel. L'expression de la durée moyenne de stockage est donnée par :

$$\text{durée moyenne de stockage} = \int_{W+L}^{\infty} \frac{R(x)}{R(t)} dx$$

Le coût de stockage vaudra donc :

$$CS(W) = h \int_{W+L}^{\infty} \frac{R(x)}{R(t)} dx$$

L'expression du coût total moyen est donnée par :

$$CT(W) = h \int_{W+L}^{\infty} \frac{R(x)}{R(t)} dx + \pi \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx$$

L'instant optimal de lancement de commande W^* est solution de l'équation :

$$\frac{dCT(W)}{dW} = 0$$

Ce qui donne au final :

$$W^* = \frac{h}{p} * \frac{1}{\lambda} - L$$

2.4.2 Modèle avec maintenance préventive

Avec le modèle précédent, il n'est pas possible d'envisager des remplacements préventifs encore moins de définir une politique optimale pour procéder au remplacement préventif.

Un modèle généralisé avec délai de réapprovisionnement non-constant, a été proposé pour permettre d'énoncer une politique optimale de remplacement.

En plus des paramètres définis précédemment (L , π et h), le déroulement du processus de remplacement préventif est conditionné par les éléments suivants :

- t_0 : le temps de lancement de la commande d'une PDR.
- $t_0 + t_1$: le temps prévu pour le remplacement préventif.
- A : coût de passation d'une commande normale.
- A_u : coût de passation d'une commande urgente.
- $L_u(t)$: délai de livraison d'une commande urgente.

Le composant commence à fonctionner à l'instant 0, et quatre scénarii de panne sont présent :

- S'il tombe en panne avant t_0 une commande d'urgence est passée, et le composant sera installé une fois reçu.
- S'il tombe en panne après t_0 mais avant $t_0 + L$ il s'agit d'un cas de pénurie.
- S'il tombe en panne après $t_0 + L$ le composant est déjà en stock et donc il sera placé.
- Il ne tombe pas en panne avant $t_0 + t_1$

➤ **Scénario 1 : La panne se produit avant t_0**

La commande normale n'ayant pas encore été placée, il faut donc assumer le coût de la commande d'urgence et les coûts liés à la pénurie.

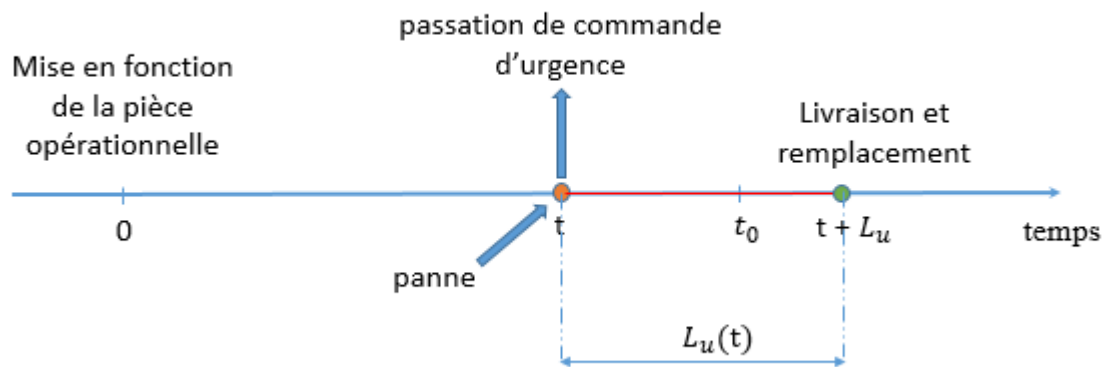


Figure 9: Processus de remplacement dans le scénario1

Le coût engendré est : $CT_1 = [A_U + \pi L_u(t)] \int_0^{t_0} f(t) dt$

La durée moyenne de remplacement est : $D_1 = \int_0^{t_0} [t + L_u(t)] f(t) dt$

➤ **Scénario 2 : La panne se produit entre t_0 et $t_0 + L$**

La panne se produit après le passage de la commande normale, mais avant la livraison de la pièce de rechange. Il faut donc assumer les coûts liés à la pénurie (le trait en rouge sur le schéma) et à la passation de commande normale.

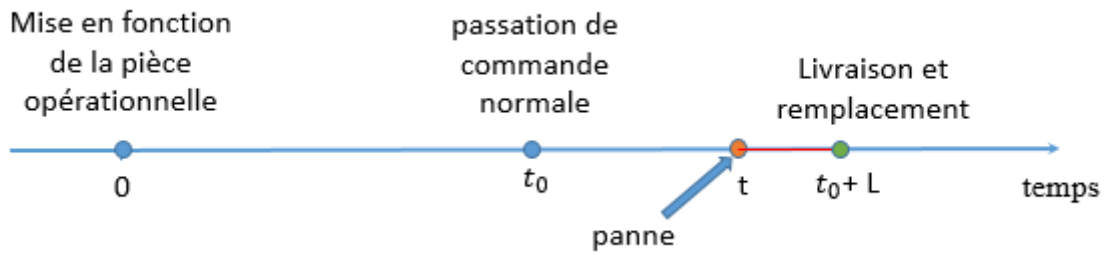


Figure 10: Processus de remplacement dans le cas du scénario 2

Le coût est égal à : $CT_2 = [A + \pi (t_0 + L - t)] \int_{t_0}^{t_0+L} f(t)dt$

La durée moyenne de remplacement est : $D_2 = (t_0 + L) \int_{t_0}^{t_0+L} f(t)dt$

➤ **Scénario 3 : La panne se produit après $t_0 + L$ mais avant $t_0 + t_1$**

La panne a lieu après la livraison de la PDR mais avant l'instant du remplacement préventif. Il faut donc assumer les coûts liés à la passation de la commande normale et au stockage de la PDR jusqu'à son utilisation dans l'inspection prévue (le trait en jaune sur la figure 13).

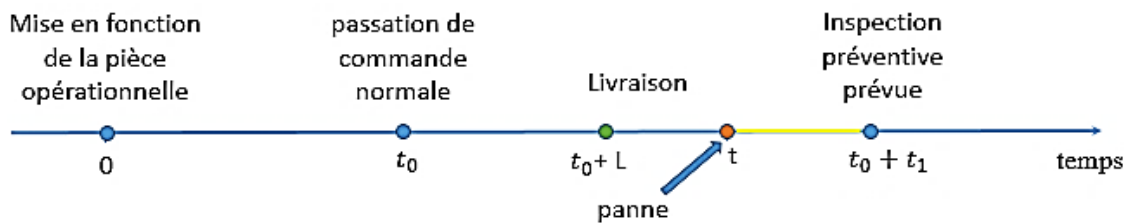


Figure 11: Processus de remplacement dans le cas du scénario 3

Le coût qui correspond à ce cas est : $CT_3 = [A + h(t - t_0 - L)] \int_{t_0+L}^{t_0+t_1} f(t)dt$

Et la demande moyenne est donnée par l'expression : $D_3 = \int_{t_0+L}^{t_0+t_1} f(t)dt$

➤ **Scénario 4 : Aucune panne ne se produit avant le remplacement préventif à $t_0 + t_1$**

Les coûts à assumer sont liés à la passation de la commande normale et au stockage de la PDR pendant une durée qui correspond au trait jaune sur le schéma.

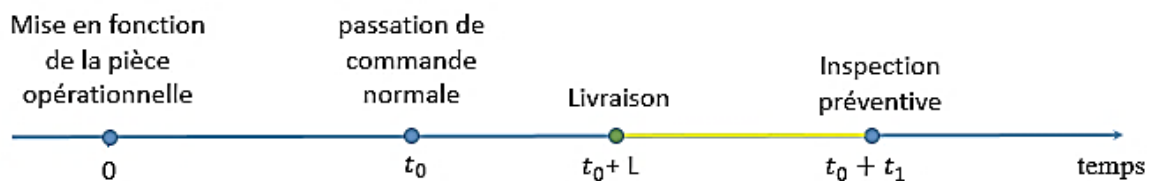


Figure 12: Processus de remplacement dans le cas du scénario 4

Le coût supporté dans ce cas est : $CT_4 = [A + h(t_1 - L)] \int_{t_0+t_1}^{\infty} f(t) dt$

La durée moyenne de remplacement est égale à : $D_4 = (t_0+t_1) \int_{t_0+t_1}^{\infty} f(t) dt$

Le coût total $CT(t_0, t_1)$ et la durée moyenne de remplacement $D(t_0, t_1)$ sont calculés respectivement par la somme des coûts moyens engendrés et des durées moyennes de remplacement pour chaque scénario.

Le modèle est utilisé en vue de déterminer les valeurs de t_0^* et t_1^* optimales qui minimisent le coût total moyen $\overline{CT}(t_0, t_1)$ qui est le rapport du coût total $CT(t_0, t_1)$ sur la durée moyenne de remplacement $D(t_0, t_1)$. [Diallo, 2006]

Les calculs exposés ci-dessus sont reprise en détails par Dohi et al [1998], et ce dans leur travail qui présente également une revue des plus récents travaux traitant de l'approvisionnement unitaire des pièces de rechange ainsi qu'une généralisation du modèle qui vient d'être exposé.

Les modèles de gestion conjointe de la maintenance préventive abordés dans ce paragraphe, considère un approvisionnement unitaire. Par ailleurs, on retrouve dans la littérature d'autres modèles qui s'intéressent à d'autres variantes, à savoir : l'approvisionnement avec réparation minimale introduit par Barlow et Hunter [1960] ainsi que l'approvisionnement par lots traité par Diallo et al [2004] après avoir exposé les limites qu'ont montré plusieurs modèles développés dans ce sens.

Conclusion :

Les modèles abordés dans ce chapitre sont propres à la gestion des stocks de la pièce de rechange, bien que les approches adoptées soient différentes, leurs principes de construction ont la même orientation, à savoir : l'adaptation aux différents concepts qui régissent le domaine de la maintenance industrielle.

Chapitre 3 : Positionnement scientifique d'un nouveau modèle d'optimisation de la gestion des pièces de rechange

« L'identité se construit en fonction de l'« altérité » ou des « altérités », par rapport aux « Autres » et sous le regard extérieur des « Autres ». »
(Benoit, 2008 : 146).

Au terme des deux chapitres présentant l'ensemble des modèles de gestion des stocks de la pièce de rechange, nous proposons dans le présent chapitre l'étude d'un nouveau modèle d'optimisation développé dans ce sens. L'étude en question consiste à présenter le modèle, analyser sa sensibilité par rapport à ses paramètres et finalement le positionner par rapports aux modèles abordés dans les chapitres précédents.

Le modèle d'optimisation de la gestion des PDR, sujet de ce chapitre, était développé dans le cadre d'un projet de fin d'études au sein d'une entreprise prestataire de maintenance, [Boudia et Chergui, 2017]. L'objectif étant de minimiser des coûts liés à l'approvisionnement excessif de pièces de rechange, ainsi que les coûts extrêmement chers qu'engendre la rupture de ces dernières.

3.1 Hypothèses et fondements du modèle

Le modèle s'intéresse à un système de J machines en fonctionnement continu, soumises à un plan de maintenance préventive systématique, les dates des inspections, et donc des remplacements des PDR endommagées sont connues au préalable. Les machines acceptent une interchangeabilité en termes de pièces de rechange, et nous nous intéressons à un seul type de PDR dans le raisonnement, pour simplifier le concept. La généralisation sur les autres types de PDR se fait d'une manière très directe, pourvu qu'ils soient soumis aux hypothèses du modèle.

L'intervalle de temps entre deux inspections correspond à la durée maximale de fonctionnement continu que ces pièces peuvent supporter, au bout de ce temps elles doivent être remplacées. Nous ajoutons également, que les pièces désinstallées dans une inspection peuvent être réutilisées après une réparation dans des ateliers spécialisés. Cette réutilisation est faite dans les limites imposées par la durée de vie totale de la pièce, la durée au bout de laquelle la pièce ne peut plus être réparée.

D'une autre part, ces pièces désinstallées lors d'une inspection préventive, sont remplacées par des pièces semblables, qui peuvent, elles aussi, être des pièces réparées. En plus, nous nous intéressons aux pièces dont l'ensemble des coûts de réparation sur toute leurs durée de vie, sont supposés largement inférieurs aux coûts liés à l'acquisition d'une nouvelle pièce semblable. Il en résulte alors que le levier principal de l'optimisation visée par notre travail réside dans le fait d'exploiter au maximum cette caractéristique de réutilisation, et éviter ainsi l'achat excessif de nouvelles pièces.

Finalement il faut signaler que, sur une période de fonctionnement, le nombre d'heures de marche enregistré pour les pièces, n'est pas égal au nombre d'heures calculés simplement à partir de nombre de jours compris dans cette période, car ce fonctionnement peut être influencé par plusieurs facteurs externes. On parle alors, d'un nombre d'heure de marche équivalent calculé à partir d'un facteur de conversion défini par le système d'exploitation des pièces.

3.2 Présentation du modèle

Il s'agit d'un modèle d'optimisation formulé mathématiquement, en considérant une fonction objectif de minimisation avec deux variables de décisions et six principales contraintes, son but final est de calculer le nombre optimal de PDR à mettre en stock pour satisfaire la période d'exploitation sur laquelle est établi le planning de maintenance préventive. La solution que ce modèle donne, propose également, comment ces PDR doivent être installées dans les inspections préventives. C'est-à-dire, il est en mesure de déterminer quelle est la pièce qui doit être installée dans chaque remplacement. Il est présenté comme suit :

Fonction objectif:

$$\text{Min } f(X_{ijk}) = \sum_{i=1}^{i=n} [C_{max} - \text{InitFFH}_i - \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) - Y_i * C_{max}]$$

Sous contraintes:

$$D_{minj} \leq D_{jk+1} - D_{jk} \leq D_{maxj} \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (1)$$

$$X_{ijk} + X_{ijk+1} \leq 1 \quad \forall i \in E_I, \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Si } D_{jk} \leq D_{j'k'} \leq D_{jk+1} + R * 7$$

$$\text{Alors } X_{ijk} + X_{ij'k'} \leq 1 \quad \forall k, k' \in E_K \text{ avec } k' \neq k, \quad \forall j, j' \in E_J \quad \text{et} \quad \forall i \in E_I \dots (3)$$

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * (D_{jk+1} - D_{jk}) \leq C_{max} \quad \forall i \in E_I \dots \dots \dots (4)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in E_J \quad \text{et} \quad \forall k \in E_K \dots \dots \dots (5)$$

$$\sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} * Y_i = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^{j=J} \sum_{k=1}^{k=K} X_{ijk} \neq Y_i \quad \forall i \in E_I \dots \dots \dots (6)$$

Avec :

- E_I :** L'ensemble des pièces.
- E_J :** L'ensemble des machines.
- E_K :** L'ensemble des inspections.
- D_{jk} :** La date de la $k^{ième}$ inspection sur la $j^{ième}$ machine.
- InitFFH_i :** Le nombre d'heures de marche initial de la pièce i .
- EQ_j :** Le nombre d'heures de marche équivalent à un mois d'exploitation de la machine j .
- n :** Le nombre de pièces prévues pour être utilisée.
- J :** Le nombre de machines dans le système.
- K :** Le nombre d'inspection prévu pour chaque machine.
- R :** Le temps nécessaire pour la réparation de la pièce en nombre de semaines.
- C :** La durée de vie de ce type de pièces, en nombre d'heure de marche équivalent.
- D_{maxj} :** La durée maximale entre deux inspections de la machine j , en nombre d'heures de marche équivalents.
- D_{minj} :** La durée minimale entre deux inspections de la machine j , en nombre d'heures de marche équivalents.

$$X_{ijk} = \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si la pièce } i \text{ est installée dans la } k^{\text{ème}} \text{ inspection de la turbine } j. \\ \mathbf{0} & \text{sinon} \end{cases}$$
$$Y_i = \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si la pièce } i \text{ est installée au moins une fois.} \\ \mathbf{1} & \text{sinon} \end{cases}$$

La solution obtenue est lue comme suit :

- Un tableau booléen de trois dimensions, remplis des valeurs des X_{ijk} indiquant quelle pièce i doit être installée dans chaque inspection k sur chaque machine j , il s'agit de la pièce i dont le X_{ijk} est non nul.
- Un tableau unidimensionnel comportant les valeurs des Y_i dont le nombre des valeurs nulles indique combien de pièces sont utilisées pour tout le planning de maintenance préventive sur la période considérée.

3.3 Etude de sensibilité du modèle

Comme son nom l'indique, une étude de sensibilité permet de quantifier la sensibilité du modèle aux variations d'un paramètre caractéristique du système. Pour y parvenir, nous avons procédé par simulation sur le logiciel CPLEX qui a été initialement utilisé dans la construction du modèle d'après [Boudia et Chergui, 2017] en choisissant judicieusement les scénarii en vue de déterminer l'influence précise de chaque paramètre étudié.

4.3.1 Sensibilité par rapport aux nombre de machines

Nous nous demandons dans cette partie, si la variation du nombre de machines impliquées dans le modèle, possède une influence prépondérante sur les résultats obtenus. Pour ce faire, nous allons appliquer le modèle sur les deux cas suivant :

1er cas : 2 systèmes de production, comprenant chacun 3 machines, et gérés indépendamment avec l'impossibilité d'inter changer les PDR entre eux. Le nombre total N_1 de pièces, nécessaire pour alimenter 4 cycles de maintenance pour chaque machine, est calculé en faisant la somme des nombres de pièces déterminé en appliquant le modèle sur chacun des sites.

2ème cas : Les deux systèmes de production sont gérés mutuellement, et considérés alors comme un seul système a 6 machines, avec :

- Le calendrier de maintenance est établi par la superposition des deux calendriers de maintenance des deux sites.
- Le stock initial de chaque pièce est égal à la somme des stocks initiaux de cette pièce dans chaque système.
- Les deux systèmes acceptent une interchangeabilité des PDR.

Le nombre total N_2 , des pièces nécessaires pour le déroulement de 4 cycles de maintenance pour chaque machine, est celui obtenu en appliquant le modèle d'optimisation sur ce système.

Les résultats obtenus, montrent que notre modèle d'optimisation est très sensible aux nombre de machines impliquées dans le système étudié, dans le sens où plus le nombre de machine est grand, plus nombre total de pièces utilisées est réduit. Il en résulte alors, que ce modèle d'optimisation fonctionne beaucoup plus efficacement sur les systèmes de grande taille.

4.3.2 Sensibilité au temps de réparation des PDR

Pour un même planning de maintenance, le modèle appliqué à un système donné présente un nombre de PDR différent en fonction du temps de réparation. En effet, on constate que les pièces qui ont un temps de réparation petit permettent une meilleure optimisation que celles qui prennent plus de temps pour être réparée. Par le temps de réparation, nous sous-entendons également les délais de transport de ces pièces entre le site d'exploitation et l'atelier de réparation.

Par ailleurs, cette constatation paraît évidente, du moment où tous les modèles développés pour la gestion des stocks des pièces de rechange démontrent la même sensibilité au temps de réparation, et de même pour d'autres paramètres comme la durée de vie de la pièce et la durée maximale entre deux inspections préventives. En effet, sur une même période d'exploitation, chacune de ces deux grandeurs influence inversement le nombre total de pièce nécessaire pour les cycles de maintenance. En effet, il est clair que nous avons tendance à utiliser moins de pièces de rechange dans le système considéré si la durée de vie de chaque pièce, ou encore la durée entre deux inspections successives sont très grande.

De ce fait, il est intéressant d'étudier la sensibilité du modèle par rapport à une combinaison de paramètres, comme est le cas dans le prochain paragraphe.

4.3.3 Sensibilité au rapport : temps de réparation / la durée minimale entre deux inspections successives

Le rapport entre le temps de réparation et la durée minimale entre deux inspections successives, est une grandeur qui mesure la rapidité de la réutilisation des pièces désinstallées. Plus ce rapport tend vers zéro, plus le processus de réutilisation est rapide. Inversement, si ce rapport est supérieur à un, le système ne peut récupérer une pièce réparée qu'après plusieurs inspections succédant celle où elle était désinstallée, chose qui va favoriser l'achat d'une nouvelle pièce au lieu d'exploiter celle qui est en attente de récupération.

Par conséquent, le modèle étudié présente une grande sensibilité à ce rapport, les résultats d'optimisation sont plus satisfaisants dans les systèmes où ce rapport tend vers zéro.

4.3.4 Sensibilité par rapport à la nature de la demande

La demande des pièces considérées est indépendante des besoins de la maintenance curative, et donc le raisonnement que nous avons adopté dans la conception du modèle est basé essentiellement sur le planning de maintenance préventive. Ceci semble rendre le modèle figé et manque de flexibilité, or ce n'est pas le cas. En effet, si au cours de la période d'exploitation considérée, une panne imprévue se produit nécessitant le remplacement d'une pièce, alors la perturbation qui en résulte sur le planning de maintenance préventive, peut être prise en considération dans le modèle, en vue de modifier les résultats de manière adéquate.

Dans ce cas, l'utilisateur peut réintroduire les nouvelles dates des inspections établies après l'occurrence de la panne, ainsi que les informations mises à jour des pièces disponibles en stocks en termes de leur cumul d'heures de marche équivalent, et l'exécution du modèle va par la suite, générer le nouveau besoin optimal pour la durée restante de la période d'exploitation.

4.4 Positionnement scientifique du modèle

Dans le dernier paragraphe de ce document, nous procédons à un positionnement scientifique du modèle d'optimisation de la gestion des pièces de rechange, exposé ci-dessus, par rapport à l'ensemble des autres modèles déjà existant dans la littérature relative à ce domaine de gestion, et qui ont été exposés dans les chapitres 2 et 3 du présent document.

Pour ce faire, il convient dans un premier temps de rappeler les approches adoptées pour chacun de ces modèles.

Tableau 4 : Classification des approches utilisées pour la modélisation de la gestion des stocks de la pièce de rechange.

Modèle	Approche adoptée
Politiques Classiques d'approvisionnement	Détermination des seuils de déclenchement de la commande et calcul de la quantité optimale à commander en minimisant les coûts d'approvisionnement et de stockage.
Modèle basé sur la prévision de la demande	Exploiter les historiques de la demande pour comprendre son comportement, et calculer la demande future par des méthodes de prévision adéquates.
Modèle de maintenance préventive	Déterminer le besoin en pièce de rechange à partir du planning de maintenance préventive, tout en introduisant la probabilité d'occurrence d'une panne nécessitant une intervention curative.
Modèle basé sur la loi de dégradation	Exploiter les recommandations du fournisseur pour étudier le comportement de la dégradation des pièces, et calculer un ensemble de paramètres permettant de déterminer le besoin en pièces de rechange selon le taux de service souhaité.
Modèle du « Repair Man Problem »	Introduction d'un processus de réparation en parallèle avec celui de consommation, où chacun d'eux présente un comportement aléatoire régit par une loi de probabilité. La détermination du besoin en pièces de rechange se fait à travers un calcul probabiliste basé sur le principe des files d'attente.

Avant, de commencer la comparaison, nous tenons à signaler que ce modèle s'intéresse à l'étude quantitative de la problématique considérée, sans pour autant prendre en charge la dimension temporelle pour déterminer le temps optimal de passation de commande d'achat d'une nouvelle pièce, ni celui d'établissement d'un ordre de réparation.

L'approche adoptée dans la construction du modèle consiste à suivre la consommation, la réparation et la réutilisation des pièces de rechange sur un planning de maintenance préventive défini, et ce dans un environnement très déterministe, où les paramètres d'exploitation et de réparation sont connus.

C'est une approche qui reste très loin de celle adoptée dans les modèles à base des politiques classiques d'approvisionnement, et ce à cause des hypothèses et des fondements qui la régissent. En d'autres termes, même si les deux approches ont le même principe d'optimisation et de réduction des coûts, l'environnement de l'étude reste différent, dans le sens où les politiques classiques d'approvisionnement ne s'intéressent pas à un processus de réutilisation.

La même constatation est faite, si nous comparons entre les modèles de prévision de la demande et le modèle étudié dans ce chapitre. Ce dernier se positionne clairement dans un environnement où la demande est connue et est plus ou moins stable, et détermine ensuite ses besoins avec un suivi de la consommation sans avoir recours à une méthode de prévision en fonction du temps. Ceci est dû essentiellement au fait que la demande, en plus d'être stable, elle est aussi intermittente.

Par ailleurs, les modèles basés sur la gestion conjointes de la maintenance préventive, ainsi que ceux basés sur la loi de dégradation des pièces sont très proche du modèle d'optimisation exposé dans ce chapitre. En effet, ce modèle correspond au cas de figure étudié dans le scénario 4 des modèles de la première approche, et représente en même temps une version déterministe des modèles de la deuxième, du moment où il s'intéresse à un processus de remplacement préventif systématique.

Que ce soit pour l'approche de gestion conjointe, ou pour celle basée sur la loi de dégradation, la différence avec notre modèle, réside encore dans la nature des pièces considérées de point de vue de leur réutilisabilité dans le processus de consommation.

Finalement, et par rapport au modèle du « Repair Man Problem », la prise en compte du processus de réparation est cette fois un point en commun avec le modèle que nous avons développé. Néanmoins, l'approche de modélisation est différente. Le premier modèle suit une approche probabiliste qui considère que les processus de consommation et de réparation sont aléatoires, contrairement au deuxième qui suppose une consommation et une réparation très déterministe.

Conclusion :

Dans ce dernier chapitre de l'étude nous avons présenté un nouveau modèle de gestion des flux de la pièce de rechange. Ensuite, ce modèle a fait l'objet d'une analyse de sensibilité par rapport aux différents paramètres imposés sur son contexte d'étude. Finalement, nous nous sommes intéressés à une analyse comparative de ce modèle par rapport aux autres modèles de gestion des stocks de la pièce de rechange, et ce en guise de mettre en avant ces caractéristiques.

Conclusion générale

« Que la stratégie soit belle est un fait, mais n'oubliez pas de regarder le résultat »

Winston Churchill

L'étude faisant objet de ce travail est élaborée dans une optique de résolution d'une problématique d'optimisation particulière. D'une manière générale, elle s'inscrit dans les travaux d'amélioration de la maintenance des équipements industriels, à travers la présentation des différentes approches adoptées dans la gestion des stocks des pièces de rechange. Sa particularité réside dans la mise en valeur d'un nouveau modèle d'optimisation développé dans ce domaine de gestion. Un modèle qui a été présenté en détail dans le présent document.

Dans la structuration du document, nous nous sommes intéressés à la présentation d'une revue de littérature sur les modèles de gestion des pièces de rechange, en les classant dans deux grandes catégories : des modèles généraux et des modèles spécifiques, et ce en vue d'avoir plus de clarté. Les deux catégories font respectivement l'objet du premier et deuxième chapitre du document.

Nous avons consacré le premier chapitre à la présentation détaillée des modèles de gestion des stocks en général, et qui sont applicable sur le cas des pièces de rechange, et ce après avoir exposé un ensemble de fondements théoriques sur ce domaine de gestion. Ces modèles ont été classés en deux approches différentes : celle basée sur les politiques classiques d'approvisionnement, et celle basée sur les méthodes de prévision de la demande.

Quant au deuxième chapitre, les modèles qui y sont abordés, sont des modèles développés spécialement pour la gestion des stocks de la pièce de rechange, qui accordent plus d'importance au processus de consommation dans un contexte de maintenance industrielle. Par conséquent nous avons jugés essentiel de le débiter avec un aperçu général sur les concepts de la maintenance industrielle. Les approches adoptées dans cette catégorie de modèles, ont été classées en trois orientations différentes : La première est basée sur la loi de dégradation des pièces et la deuxième, est basée sur la gestion conjointe des stocks de la pièce de rechange avec le plan de maintenance préventive. Finalement la troisième approche consiste à introduire le processus de réparation et réutilisation des pièces et l'analyser avec une démarche probabiliste.

A l'issue de cette revue de littérature, le troisième chapitre vient enfin, pour introduire un nouveau modèle que nous avons développé pour l'optimisation de la gestion des stocks de la pièce de rechange. Après l'avoir présenté en détails, nous nous sommes intéressés à effectuer une analyse de sensibilité dudit modèle pour procéder finalement à un positionnement scientifique permettant de le comparer par rapport aux autres modèles présentés dans les chapitres précédents.

Bien que son contexte d'étude soit limité par des hypothèses très particulières, le nouveau modèle d'optimisation de la gestion des pièces de rechange que nous avons proposé et analysé dans cette étude, possède des perspectives d'application très prometteuse.

Bibliographie

Références Bibliographiques

A

[AFNOR, 2016] Créée en 1926, AFNOR est une association régie par la loi de 1901, composée de près de 2 500 entreprises adhérentes. Sa mission est d'animer et de coordonner le processus d'élaboration des normes et de promouvoir leur application.

[Arda, 2008] Yasemin Arda, Politiques d'approvisionnement dans les systèmes à plusieurs fournisseurs et Optimisation des décisions dans les chaînes logistiques décentralisées, thèse de Doctorat à L'université De Toulouse délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 14 janvier 2008.

[Axsäter, 2000] Inventory Control, MA : Kluwer, Norwell, 2000.

[Arrow et al, 1958] Arrow, K. A., Karlin, S. and Scarf, H. E. Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production, Stanford University Press, California, 1958.

B

[Babai, 2005] Mohamed Zied Babai. Politiques de pilotage de flux dans les chaînes logistiques : impact de l'utilisation des prévisions sur la gestion de stocks. Thèse de doctorat. Sciences de l'ingénieur [physics]. Laboratoire Génie Industriel, Ecole Centrale Paris, 2005.

[Barlow et Hunter, 1960] Barlow R. E., L. C. Hunter (1960). Optimal préventive maintenance policies, *Opérations Research*, vol. 8, pp. 90-100.

[Buzacott et Shanthikumar, 1993] Buzacott, J. A. and Shanthikumar, J. G. *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Printice Hall, New Jersey, 1993.

[Bookbinder et Lordahl, 1989] Bookbinder JH and Lordahl AE (1989). Estimation of inventory re- order levels using the bootstrap statistical procedure. *IIE Trans* 21: 302-312.

[Boudia et Chergui, 2017] Modélisation et optimisation de l'utilisation des pièces de rechange pour les besoins de la maintenance préventive. Cas d'étude : les pièces capitales au sein de General Electric Power Services. Mémoire de fin des études d'ingénieur, Département Génie Industriel, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Juin 2017.

C

[Charles AS, 2000] Modélisation des défaillances des équipements d'une unité de production de composants électroniques. Optimisation des stratégies de maintenance. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

[Croston, 1972] Croston JD (1972). Forecasting and stock control for intermittent demands. *Oper Res Quart* 23(3) pages: 289-303.

[Clark et Scarf, 1960] Clark, A. J. and Scarf, H. Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem, *Management Science*, vol. 6, pp. 474-490, 1960.

D

[Diallo, 2006], Claver Diallo. Développement D'un Modèle D'identification Et De Gestion Des Pièces De Rechange. Thèse de Philosophiae Doctor (Ph.D.). Faculté des études supérieures de l'Université Laval du Québec

[Dohi et al, 1998] Dohi T., N. Kaio, S. Osaki (1998). On the optimal ordering policies in maintenance theory - survey and applications, *Applied Stochastic Models and Data Analysis*, vol. 14, pp. 309-321.

[Diallo et al, 2004], Diallo C, D. Aït-Kadi, A. Chelbi (2004). A joint spare-provisioning and préventive maintenance strategy for availability maximization under limited resources, *Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM.C*. Spitzer, U. Schmocker, and V. N. Dang, Eds., pp. 2840-2846, Springer-Verlag, Berlin - Germany.

F

[Furtuna, 2010] guide des travaux pratiques, « *Organisation et gestion des pièces de rechange* », Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail, Direction recherche et ingénierie de formation, Maroc. Disponible sur internet à partir du lien : <http://www.scribd.com/doc/51551562/M16-ORGANISATION-ET-GESTION-DES-PIECES-DE-RECHANGE-TH-RMC>

G

[Gamero et al, 1998] Gamero MJ, Garcia JM and Reyes AM (1998). Bootstrapping statistical functionals. *Stat Probab Lett* 39(3): 229

[Ghobbar et Friend, 2003] Ghobbar AA and Friend CH (2003). Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation: a predictive model. *Comput Oper Res* 30: 2097

[Gross et Harris, 1971] Gross, D. and Harris, C. M. On one-for-one-ordering inventory policies with statedependent leadtimes, *Operations Research*, vol. 19, pp. 735-760, 1971.

H

[Harris, 1913] Harris, F. How many parts to make at once, *Factory, The magazine of Management*, vol. 10, pp. 135-136, 1913.

[Hadley et Whitin, 1963] Hadley, G. and Whitin, T. Analysis of Inventory Systems, Prentice-Hall, NJ, 1963.

I

[ISO 9001 version 2008] Management de la maintenance.

K

[Karlin, 1960] Karlin, S. Dynamic Inventory Policy With Varying Stochastic Demands, *Management Science*, vol. 6, pp. 231-258, 1960.

N

[NF X 60-012] Norme de Maintenance : termes & définitions des éléments constitutifs des biens & de leur approvisionnement.

P

[Pimor, 2008] Logistique, Production, Distribution, Soutien, Dunod, Paris.

R

[Roux, 2011] Entrepôts et magasins 'Tout ce qu'il faut savoir pour concevoir une unité de stockage. Prix littéraire 2011 de Supply chain magazine avec le concours de Generix Group Sixième édition.

S

[Syntetos et Boylan, 2001] Syntetos A. A., J. E. Boylan (2001). On the bias of intermittent demand estimates, *International Journal of Production Economics*, vol. 71, (1-3), pp. 457-466.

[Snyder, 2002] Snyder R (2002). Forecasting sales of slow and fast moving inventories. *Eur J Opl Res* 140: 684

[Silver at Peterson, 1985] Silver, E. A. and Peterson, R. Decision Systems for Inventory Management and Production Planning, John Wiley and Sons, New York, 1985.

T

[Taylor et Jackson, 1954] Taylor J., R. R. P. Jackson (1954). An application of the birth and death process to the provision of spare machines, *Opérations Research*, vol. 5, (4), pp. 95-108.

W

[Willemain et al, 2004] Willemain T. R., C. N. Smart, J. H. Shockor, P. A. DeSautels (Dec. 1994). Forecasting intermittent demand in manufacturing: a comparative évaluation of Croston's method, *International Journal of Forecasting*, vol. 10, (4), pp. 529-538.

[Wilson, 1934] Wilson, R. H. Scientific Routine for Stock Control, *Harvard Business Review*, vol. 13, pp. 116-128, 1934.

[Wang et Rao, 1992] Wang M and Rao SS (1992). Estimating reorder points and other management science applications by bootstrap procedure. *Eur J Opl Res* 56: 332-342

Z

[Zipkin, 2000] Zipkin, P. H. Foundations of Inventory Management, McGraw-Hill, USA, 2000.

Liste des ouvrages consultés

Santus P., 2009, « *Organisation de la gestion des pièces détachées* », Rapport de travail doption réalisé au sein du Groupe Atlantic, Option Gestion Scientifique, Ecole des Mines – Paris Tech, Paris. Disponible sur internet à partir du lien :

<http://www.cgs.ensmp.fr/old/options/GS/rapports/09Atlantic.pdf>

Z. S. Hua, B. Zhang, J. Yang and D. S. Tan, A New Approach of Forecasting Intermittent Demand for Spare Parts Inventories in the Process Industries. Source: The Journal of the Operational Research Society, Vol. 58, No. 1 (Jan, 2007), pp.52-61. Disponible sur internet à partir du lien : <http://www.jstor.org/stable/4622667>

J. Stoll • R. Kopf • J. Schneider • G. Lanza, Criticality analysis of spare parts management: a multi-criteria classification regarding a cross-plant central warehouse strategy. Received: 14 October 2014 / Accepted: 29 January 2015 / Published online: 4 February 2015.

Adnane Lazrak, Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange. Ecole des Mines de Nantes, 2015.

Arts, J. J. (2013). Spare parts planning and control for maintenance operations Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100/IR760116