

# Modèles de maîtrise des risques dans la gestion des pièces de rechange

**BOUNOU Oumaima, EL BARKANY Abdellah et EL BIYAALI Ahmed**

Laboratoire de génie mécanique, Faculté des Sciences et Techniques, Route d'Imouzzar, BP. 2202, Fès, Maroc.

Emails: ouma2408@gmail.com, a\_elbarkany2002@yahoo.fr, biyaali@yahoo.fr

*Thème: Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*

**Résumé** — La disponibilité d'un équipement de production est influencée par le temps de sa réparation. Ce dernier est aussi influencé par le temps d'obtention d'une pièce de rechange ou de remplacement. Le niveau de l'inventaire des pièces de rechange ; contraint par le coût de stock et la pénalité d'avoir une rupture de stock ; peut également être influencé par le temps d'obtention des pièces de rechange.

Le jugement d'ingénierie et d'expérience sont utilisés dans l'analyse de risques en combinant la probabilité de rupture de stock et ses conséquences. Par contre, les modèles d'inventaire traditionnels se concentrent sur la caractérisation des politiques de réapprovisionnement afin de maximiser les bénéfices totaux prévus. Ils sont loin de répondre aux besoins des planificateurs des contre-risques et ne suggèrent pas des mécanismes pour réduire les niveaux des bénéfices défavorables. Quelques auteurs ont intégré le principe de risque de rupture dans leur modélisation en se basant sur différents modèles comme les modèles probabilistes et graphiques.

Dans cet article, nous allons présenter des exemples sur ce type de modèles, une approche semi-quantitative constituée de deux parties et une approche de modélisation d'aversion de risque pour le problème multi-période dans le but de maximiser l'utilité attendu de la valeur nette du revenu. Ainsi, nous allons présenter un contrôle de stock pour multiple pièces à travers un modèle d'inventaire à source unique en prenant en considération d'avoir un stock de sécurité pour éviter la rupture.

**Mots-clés** — *Pièces de rechange ; gestion de risque ; modélisation ; stock de sécurité ; pénurie.*

## I. INTRODUCTION

La disponibilité d'un équipement de production est influencée par le temps de sa réparation. Ce dernier est aussi

influencé par le temps d'obtention d'une pièce de rechange ou de remplacement. Le niveau de l'inventaire des pièces de rechange ; contraint par le coût de stock et la pénalité d'avoir une rupture de stock ; peut également être influencé par le temps d'obtention des pièces de rechange.

La logistique des pièces détachées est très spécifique car elle met en jeu un très grand nombre de références de pièces plus ou moins critiques pour le fonctionnement de l'appareil. Ces pièces doivent être disponibles dans un délai très court.

Le jugement d'ingénierie et d'expérience sont utilisés dans l'analyse de risques en combinant la probabilité de rupture de stock et ses conséquences.

Par contre, les modèles d'inventaire traditionnels se concentrent sur la caractérisation des politiques de réapprovisionnement afin de maximiser les bénéfices totaux prévus. Ils sont loin de répondre aux besoins des planificateurs des contre-risques et ne suggèrent pas des mécanismes pour réduire les niveaux des bénéfices défavorables.

Il y a des modèles utilisés qui prennent en considération un pourcentage de risque acceptable, ce qui est équivalent à l'obtention d'un stock d'alerte. La détermination du stock optimum à détenir peut se faire à l'aide des lois probabilistes de rupture des pièces et du coût engendré. Cette détermination se fait d'une manière pragmatique à l'aide des abaques.

Concernant le taux de pénurie, il peut être calculé à l'aide de la formule Wilson en évitant les ruptures de stock. Quelques auteurs ont intégré le principe de risque de rupture dans leur modélisation en se basant sur différents modèles comme les modèles probabilistes et graphiques.

Ce document est constitué de deux parties : la première partie est consacrée à l'état de l'art où nous allons présenter une approche semi-quantitative constituée de deux phases et

une approche de modélisation d'aversion de risque pour le problème multi-période qui vise de maximiser l'utilité attendu de la valeur nette du revenu. Ainsi, nous allons présenter un contrôle de stock pour multiple pièces à travers un modèle d'inventaire à source unique en prenant en considération d'avoir un stock de sécurité pour éviter la rupture. La deuxième partie est consacrée aux exemples d'études de cas réalisées comme étant application des modèles abordés théoriquement.

### III. ETAT DE L'ART

L'évaluation du risque de défaillances des composants se fait à l'aide de la loi dégradation, en exploitant les historiques de pannes.

En se basant sur l'ouvrage de Ziane [11], la gestion du stock par point de commande provoque un problème au de la détermination du stock d'alerte. Ce stock vise à minimiser le risque de pénurie. Il est déterminé à l'aide des lois de probabilité usuelles. Les lois plus utilisées dans l'estimation de la demande et stock d'alerte sont la loi normale et loi de poisson.

Dans le but de contrôler le stock de sécurité probabiliste de multiple pièces, Fergany a proposé dans son article [1] un modèle d'inventaire de source unique avec zéro délai et coût variable de commande sous deux contraintes sur le coût de maintien et le coût de stock de sécurité.

Le rôle du stock de sécurité est d'éviter la pénurie durant la période en absorbant les fluctuations de la demande. Le nombre optimal des périodes et les niveaux maximaux optimaux d'inventaire sont obtenus en appliquant les techniques géométriques de programmation sur le système. Sous les hypothèses prises en compte par Fergany, la fonction du coût total attendu est décrite dans le système (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \min E(TC) = \sum_{r=1}^n [C_{pr} E(D_r) + C_{or} N_r^{\beta-1} + \frac{C_{hr} E(D_r) N_r}{2} + C_{hr} E(D_r) v] \\ \sum_{r=1}^n \frac{C_{hr} E(D_r) N_r}{2K_1} \leq 1 \text{ et } \sum_{r=1}^n \frac{C_{hr} E(x_r) v}{N_r K_2} \leq 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

Le risque peut être considéré comme une combinaison de probabilité de rupture du stock et ses conséquences. En utilisant les principes de programmation linéaire, (Bharadwaj et al) ont développé dans leur article [2] un modèle d'optimisation du risque sous forme d'une approche semi-quantitative. Le but de cette approche est de trouver les nombres optimaux de différentes parties de l'inventaire qui doivent être stockés sous les contraintes du budget. Son modèle est constitué de deux parties :

- La première partie concerne l'obtention des valeurs de références pour certains paramètres à optimiser dans la deuxième partie du modèle. Lorsqu'un peu d'information sur les paramètres est connu, la distribution du nombre de demande, la plus utilisée, est la distribution uniforme. Parmi les paramètres utilisés dans cette partie : la probabilité de rupture du stock pour chaque pièce exprimée par l'équation (2), la valeur du risque associé à la rupture de stock est calculée en se basant sur cette probabilité.

$$p(x_i) = 1 - \frac{\text{nombre de références de pièces}}{\text{nombre idéal de pièces}} \quad (2)$$

- La deuxième partie concerne obtention des valeurs optimisées. Elle consiste à optimiser le nombre de chaque pièce tenu en stock à partir de valeurs de référence sélectionnées dans la 1ère partie soumises à des contraintes spécifiques en utilisant l'outil de la programmation linéaire.

Le modèle a trois modes de performances pour trois fonctions distinctes :

- Minimiser le risque total : pour un budget de stockage (coût total de stockage), la valeur totale du risque est minimisée.
- Minimiser le coût total : minimiser le coût total de stockage pour maintenir un niveau de référence de la valeur totale du risque
- Minimiser la valeur totale du risque ou coût total de stockage sous réserve du maximum des contraintes de risques individuels

Pour le problème de multi-période et la couverture du risque d'exploitation, (Chen et al) ont proposé dans leur document [3] une approche de modélisation d'aversion de risque dont l'objectif est de maximiser l'utilité attendu de la présente valeur nette du revenu et de flux de consommation sur l'horizon de planification. Dans le modèle d'utilité additive, le modèle d'optimisation peut être résolu par programmation dynamique. (Chen et al, [3]) ont proposé un modèle avec des fonctions d'utilité exponentielle dont l'un des paramètres est le facteur de tolérance du risque.

(Chen et al, [3]) ont conclu que La politique (s, S) est optimal lorsque le prix n'est une variable de la décision. Par contre, dans le cas de la demande, additive la politique (s, S, P) est optimal et dans le cas général la politique optimale est la politique (s, S, A, P).

Pour le problème d'inventaire dynamique, Scarf a démontré dans son document [4] que la politique optimale est du type simple (S, s) sous la condition sur les coûts d'exploitation et de pénurie soient supposés linéaires.

En se basant sur une analogie avec la théorie des files, dans l'article [5], Lonchampt a décrit une méthode qui permet de réaliser une valorisation technico-économique d'un stock de pièces de rechange, ceci en évaluant tous les moments probabilistes des coûts générés par un stock directement (approvisionnement et stockage) ou indirectement (indisponibilité due à rupture de stock) à travers les matrices décrites.

Lorsque le stock est composé des pièces non réparables et réparables, (Louit et al) ont présenté dans l'article [7] les différentes approches pour la détermination de la taille optimale du stock des pièces de rechange relativement coûteuse. Ces approches sont les modèles de coûts et de risques, en considérant les scénarios de nombres illimitée et limité de serveurs de réparation disponibles. En outre, les modèles réalisés à l'estimation de la durée de vie restante d'un stock donné sont introduits.

Les critères d'optimisation considérés dans ces modèles sont la minimisation des coûts, la maximisation de la disponibilité de l'équipement, la réalisation d'un stock de

fiabilité désiré en tenant compte les calculs instantanés de fiabilité et intervalles sont considérés.

Dans l'article [8], Grzegorz a présenté les conséquences résulté des risques d'exploitation liés au risque de livraison généré par les fournisseurs, le problème est de sélectionner un homologue parmi les fournisseurs. Grzegorz a utilisé le modèle de la quantité économique de la gestion de l'inventaire pour marquer la taille optimale de livraison et choisir le moins cher.

Ghorbel a considéré dans sa thèse [9] que le délai est parmi les paramètres incertains, ainsi ce paramètre est modélisé par l'expression :  $\text{délai} = \text{délai prévu} - \text{délai réel}$ . La possibilité d'être en rupture de stock existe lorsque ce délai est négatif.

Dans la communication [10], (Ghorbel et al) ont pris en considération le risque de rupture de stock à travers la modélisation de la variable délai d'approvisionnement par les états : ok, mauvais (bad) et sur-dépassé (overpassed). Ce dernier état est pour la commande qui dépasse beaucoup le délai, et ceci peut provoquer une rupture du stock.

Selon l'article [6] de (Hagmark et H. Pernu), la politique de maintenance, la fiabilité et la demande des pièces de rechange et la pénurie sont parmi les paramètres reliés organiquement dans son modèle. Ce modèle est comme un système de simulation calcul, facile à étendre lorsque de nouvelles connaissances et fonctionnalités doivent être prises en compte. Ainsi, ce modèle utilise une distribution bêta modifiée pour la période de rupture de stock qui est une variable aléatoire de lourde queue. Pour différents types de partie pénurie, plusieurs résultats sont applicables à l'évaluation des risques.

En se basant sur l'analyse de vieillissement des pièces de rechange dans un environnement pratique, (Jaarsveld et Dekker) proposent dans le document [16] une méthode utilisée pour estimer le risque d'obsolescence des pièces de rechange. Cette méthode classe les pièces en groupes, et peut être appliquée sans l'utilisation de l'expert. D'autre manière, le risque de vieillissement est estimé pour chaque composant en utilisant le comportement des groupes similaires dans le passé. La principale source d'information utilisée dans la méthode est les données de la demande. Le taux de la demande est supposé dépendant de l'état d'un processus de Markov en temps continu.

Dans la gestion conjointe des stocks et de la maintenance traitée dans le document [12], Diallo a proposé un modèle de base qui vise à trouver l'instant optimal pour passer la commande en minimisant le coût total d'opération.

Ce coût d'opération prend en considération le coût de pénurie et le coût d'entreposage. Le coût de pénurie est en fonction de la probabilité de pénurie, ces deux paramètres sont exprimés par les deux équations (3) et (4) :

$$\text{probabilité de pénurie} = \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx \quad (3)$$

$$CP(W) = \pi \int_t^{W+L} \frac{f(x)}{R(t)} dx \quad (4)$$

Ainsi le risque de pénurie est pris en compte dans le calcul du coût total moyen dans le modèle avec maintenance préventive [12]. Ce modèle consiste à passer des commandes normales à des instants prédéterminés si le composant n'est pas tombé en panne. Dans le cas où la panne est produite avant le temps de la commande normale, une commande d'urgence est lancée et la pénurie a lieu. Ainsi la pénurie peut être provoquée entre l'instant de passation de commande et l'instant de la livraison des pièces. Alors, il y a quatre scénarios mutuellement exclusifs à considérer pour exprimer le coût total moyen en régime permanent par unité de temps, en d'autres termes le coût total est la somme des coûts de ces scénarios.

#### IV. EXEMPLES D'APPLICATION

(Chen et al) ont présenté dans son article [3] une étude numérique dans laquelle ils considèrent une utilité exponentielle additive. Ils ont essayé d'appliquer ces modèles avec différentes distributions de la demande et scénarios d'inventaire. Ils ont également observé le changement dans la politique d'inventaire sous l'influence d'aversion de risque.

Ainsi, (Louit et al) ont fait deux cas d'étude de ces modèles présentés dans l'article [7]:

- Cas d'étude pour les composants non réparable : transformateurs d'électricité. L'objectif de cette étude est de déterminer le nombre optimal de transformateurs de rechange. Le temps de panne est de forme exponentiel. Ils ont supposé qu'aucune politique de remplacement préventive n'est appliquée.

Le tableau 1 résume les données utilisées pour cette étude de cas. Table2 présente le stock optimale calculée selon deux critères différents pour l'optimisation: la fiabilité intervalle et le coût en utilisant le modèle du coût, cité dans le document [7], pour les composants non réparables avec aucun temps d'arrêt et livraison immédiat. Le niveau acceptable de risque de rupture de stock est inférieur à 1%. Depuis le taux d'échec est considérablement faible par rapport à l'intervalle de temps examiné, le nombre attendu de défaillances au cours de la période de dix mois est faible. Ainsi, le nombre optimal de pièces de rechange à conserver en stock dans les deux cas est également faible.

TABLEAU I : RESUME DES DONNEES UTILISEES DANS L'ETUDE DE CAS [7]

paramètre	valeur
Type de pièce de rechange	Transformateur non réparable

Composants en fonctionnement Taux de remplacements	150 1/3000[panne/IT.an]
horizon de planification Prix régulier par IT Coût d'urgence par IT Valeur future de rechange non utilisées	10mois $\cong$ 0.833year \$30,000 \$60,000 \$25,000

TABLEAU II: RESULTATS POUR L'ETUDE DE CAS - COMPOSANTS NON-REPARABLE [7]

Critère d'optimisation	Niveau du stock optimal	Valeur associés
fiabilité Intervalle (but=99%)	2	Fiabilité= 99.12% Coût total par an=\$20,760
Minimisation du coût	1	Coût total par an = \$18,073 Fiabilité = 93.39%

- Cas d'étude pour les composants réparables : camions de transport à une exploitation minière. Cette étude est focalisée sur le composant plus critique dans les camions. Le site utilise 39 camions, chaque camion utilise 2 composants critiques. (Louit et al) ont considéré une maintenance préventive et la capacité de réparation illimitée. Les critères considérés, dans ce cas pour déterminer le nombre initial optimal des pièces de rechange en stock, sont : la fiabilité instantanée et intervalle, la disponibilité et la minimisation du coût. un horizon de planification d'un an (6600 heures de fonctionnement) a été sélectionné (pour les calculs de fiabilité d'intervalle). Le tableau 3 récapitule les principaux paramètres de cet exemple d'application.

TABLEAU III : RESUME DES DONNEES UTILISEES DANS L'ETUDE DE CAS [7]

paramètre	valeur
Type de pièce de rechange Composants en fonctionnement Taux de remplacements	Composant réparable X 78 1/6,420.3[remplacement/ composant.op.jour]
horizon de planification taux de réparation	6,600 op.heure 0.002212 [réparation/ op.heure]
Coût par composante rechange Tenir coût pour un rechange Coût du temps d'arrêt pour un composant	\$40,000 \$1.51 par op. heure \$2173.3 par op. heure

Quatre critères d'optimisation ont été considérés pour cette étude de cas. Tableau 4 présente les principaux résultats obtenus. Comme prévu, la taille optimale du stock varie en fonction de l'objectif de l'optimisation.

TABLEAU IV: RESULTATS POUR L'ETUDE DE CAS - COMPOSANTS NON-REPARABLE

Critère d'optimisation	Niveau du stock optimal	Valeur associés
fiabilité Intervalle (but=95%)	15	fiabilité = 98.05% (pour Stock = 14, fiabilité = 94.99%)
Fiabilité instantanée (but=95%)	10	fiabilité = 97.53% (pour Stock = 9, fiabilité = 94.75%)
Disponibilité (but=99%)	6	disponibilité= 99.14 %
Minimisation du coût	14	Coût total par unité de temps = \$23.00 Fiabilité instantanée = 99.94%

Pour le groupe Atlantic, la disponibilité des pièces est un élément clé. Dans sa politique, chaque société du groupe dispose d'un magasin des pièces à côté de l'usine et gère d'une façon très artisanale. Dans [13], Santus a intégré la notion du risque dans la classification et identification des pièces. Par exemple, pour la class A des pièces, le risque d'obsolescence est très limité dans la gestion du stock et le risque de rupture est bien contrôlé pour la classe B.

Dans [14], Xavier a abordé le problème de faisabilité au terme délai avec un risque d'inférence avec le développement lié à un projet. Ainsi, la marge réalisée sur la pièce peut être un facteur de disposition à la prise de risque.

En se basant sur la gestion du compromis risque/coût dans le document [14], Xavier a proposé une méthode utilisée afin de dimensionner le stock des pièces de rechange optimum au moment de renouvellement du contrat de service de maintenance. Cette méthode permet de comparer les risques liés à la rupture de stock et les coûts, liés aux différentes politiques de stockage.

Ainsi, Xavier a entamé une analyse du risque et simulation interne risque/coût. Cette simulation est supportée par outils logiciels développé en interne par Assetsman.

Selon [15], la gestion basée sur analyse des risques est appliquée sur les pièces rarement utilisées, en d'autres termes, sur les pièces critiques pour la maintenance. Pour le risque de vieillissement obtenu théoriquement avec la méthode développé dans [16], Jaarsveld et Dekker ont donné des valeurs numériques et examiné les effets de ces valeurs sur le contrôle d'inventaire.

## V. SYNTHÈSE ET DISCUSSIONS

La plupart des modèles classiques gèrent le stock d'une manière qui se base sur le besoin au moment de commande et l'historique. Comme déjà mentionné, ces modèles peuvent prendre en considération le risque de la pénurie à travers un stock d'alerte. Cependant, ce stock peut être insuffisant pour couvrir le risque de la rupture de stock.

Quelques auteurs ont lié la notion du risque avec la notion de la probabilité dans leurs modèles. Ils prennent en considération différents facteurs comme les types des pièces, les points de stockage, ainsi les types de risque (risque de rupture de stock, risque de défaillance et risque de vieillissement). Dans ces modèles, le risque de rupture de stock est le plus dominant dû à ses conséquences sur le système industriel.

D'après l'état de l'art fait, on remarque que les modèles probabilistes représentent de manière proche l'état réel de la gestion des pièces de rechange dans l'industrie contrairement aux modèles classiques. La possibilité de fusionner les modèles classique comme le type (T,S,s) d'une manière probabiliste avec la notion du risque est un point traité par plusieurs auteurs.

## VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans la plupart des modèles représentés, le risque considéré est un risque lié à la rupture du stock. La valorisation de la rupture de stock prend en considération le temps d'arrêt de production, perte à gagner et coût de la commande urgente. Ceci est représenté dans le coût de pénurie.

La variation du délai d'approvisionnement et les fluctuations de la demande sont parmi les facteurs qui donnent lieu à la rupture du stock.

La gestion du risque dans le stock des pièces de rechange est modélisée par des modèles probabilistes et graphiques par la plupart des auteurs. Concernant les modèles classiques, parmi eux prennent en considération du risque à travers un stock d'alerte, mais ce stock reste pour certain cas insuffisant.

En guise de perspectives, il existe une grande variation dans les modèles de gestion des pièces de rechange, pour cela, nous envisageons faire une étude comparative des modèles pour choisir un modèle de référence que nous allons développer et faire la simulation.

## REFERENCES

- [1] Fergany H. A., *Periodic review probabilistic multi-item inventory system with zero lead time under constraints and ntvarying order cost*, American journal of applied sciences 2 (8), pp 1213-1217, 2005.
- [2] Bharadwaj Ujjwal R., Silberschmidt Vadim V. et Wintle John B., *Risk based optimization of spares inventory management*, Advances in production engineering of management journal 6, pp 173-184, 2011.
- [3] Xin Chen, Melvyn Sim, David Simchi-Levi et Peng sun, *Risk aversion in inventory management*, operations research 55(5), pp828-842, 2007.
- [4] Scarf H., *The optimality of (S, s) policies in the dynamic inventory problem*, mathematical methods in the social sciences, Stanford university press, Stanford, California, 1959.
- [5] Lonchamp Jérôme, *Evaluation des stocks par un modèle de file d'attente: indicateurs du risqué*, congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement, communication 60-4, octobre 2008.
- [6] Hagmark P.-E. & Pernu H., *Risk evaluation of a spare part stock by stochastic simulation*, Tampere University of

- Technology, Finland, ESREL Conference, Portugal, 18-22 September, 2006.
- [7] Louit D., Pascual R., Banjevic D., Jardine A. K. S., *Optimization models for critical spare parts inventories- a reliability approach*, journal of the operational research society 62, pp 992-1004, 2011.
- [8] Grzegorz Michalski, *Inventory management optimization as part of operational risk management*, economic computation and economic cybernetics studies and research, pp 213-222, April 2009.
- [9] Ghorbel N., *Gestion des réapprovisionnements périodiques des pièces de rechange sous incertitudes pour le MCO de parc matériels : maîtrise de risque de rupture des stocks*, thèse de doctorat, université de Vincennes Saint-Denis Paris 8, 2013.
- [10] Ghorbel N., Addouches A, EL Mhamedi A., Boujelbene Y., *Bayesian approach for spare parts replenishment policies under uncertainties*, International Journal of Engineering Research and Development, Volume 10, Issue 11, November 2014, PP.28-45.
- [11] Ziane E., *Organisation et gestion des magasins de stocks de fournitures et pièces de rechange*, Université Hassan II Ain Chock Casablanca, version 2, 2004.
- [12] Diallo C., *Développement d'un modèle d'identification et de gestion des pièces de rechange*, Université Laval, Québec, thèse de doctorat, 2006.
- [13] Santus P., *Organisation de la gestion des pièces détachées*, groupe Atlantic, mines Paris-Tech, option gestion scientifique, juin 2009.
- [14] Xavier A., *Prise en compte et évaluation des risques techniques et financiers dans les réponses à appel d'offre*, Assetsman.
- [15] Meunier A., *Fonction maintenance: gestion des pièces de rechange*, Argon consulting, 2012.
- [16] Willem van Jaarsveld, Rommert Dekker, *Estimating obsolescence risk from demand data - a case study*, Report Econometric Institute EI 2010-03, January 18, 2010.