

# Utilisation du Contrôle Qualité dans l'Optimisation de la Maintenance

Clément Dutoit, Christophe Letot, Lucas Equeter et Pierre Dehombreux

Service de Génie Mécanique  
Université de Mons (UMONS) – Faculté Polytechnique  
Mons, Belgique  
clement.dutoit@umons.ac.be

**Abstract**—Les entreprises actuelles recherchent en permanence une efficacité de production maximale. Pour atteindre cet objectif, les actions menées visent à réduire les coûts globaux de l'entreprise. Ainsi, des mesures sont prises pour assurer la disponibilité des équipements de production en même temps qu'une bonne qualité des produits. Cet article propose une étude afin d'optimiser la maintenance de l'outil de production sur base de mesure d'indicateurs qualité. Une recherche bibliographique est développée en vue de déterminer les outils qualité pouvant servir à une optimisation de la maintenance. Un exemple numérique est aussi traité sur une production par lot.

**Mots-clés**—Contrôle qualité, politique de maintenance, optimisation, maîtrise statistique des procédés.

## I. INTRODUCTION

La qualité est devenue une priorité pour la majorité des entreprises. Avec les progrès technologiques et une automatisation sans cesse plus poussée, les opérateurs ne maîtrisent plus totalement leurs procédés de production. L'afflux de données (notamment sur la qualité des produits) est de plus en plus important. Malheureusement, ces données ne sont pas toujours exploitées. Dans cet article, nous voulons décrire des outils qualité pouvant servir dans l'organisation de la maintenance.

La maintenance et la qualité sont intimement liées. En effet, un équipement mal entretenu va inévitablement voir la qualité de ses produits se dégrader par rapport à un équipement entretenu. D'ailleurs, Ollila et Malmipuro [1] ont mis en évidence l'impact important de la maintenance sur la qualité. Ils concluent même un cas d'étude en montrant que la maintenance fait partie des trois causes les plus importantes de dégradations de la qualité. Le contrôle qualité permet quant à lui de détecter des dérives. Ces dérives peuvent servir d'alarmes pour enclencher des actions de maintenance. Nous exposerons la méthodologie à suivre pour déterminer la meilleure politique de maintenance à appliquer ainsi que les paramètres d'échantillonnage optimaux.

## II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans cette section, nous allons présenter des documents intégrant une méthodologie pour utiliser des informations issues d'un contrôle qualité afin de piloter la maintenance.

Un premier article intéressant est celui de Cassady [2]. Dans ce travail, les auteurs développent une stratégie de maintenance préventive sur base du contrôle qualité. En fait, le processus de production est contrôlé par une carte de contrôle. Lorsqu'une défaillance survient, le processus devient hors-contrôle et un saut apparaît sur la carte de contrôle, ce qui permet de déclencher une maintenance corrective. Dans le but d'éviter les défaillances, une maintenance préventive est pratiquée suivant une période  $p$ . L'article permet, à partir d'un processus donné (loi de fiabilité donnée), d'optimiser la période de maintenance préventive  $p$  et les paramètres de la carte de contrôle (échantillonnage) en vue de réduire les coûts. Malgré certaines hypothèses, le document fournit des bases solides pour l'intégration du contrôle qualité dans une stratégie de maintenance préventive en vue d'une optimisation économique.

Un autre article intéressant est celui de Linderman [3]. Cet article prône une maintenance « adaptative » en fonction du contrôle qualité. Quand le processus devient instable, le planning de maintenance est revu pour accélérer la maintenance. Par contre, si le processus est stable, les intervalles de temps entre les maintenances seront revus à la hausse. L'optimisation se fait sur les coûts générés par le fonctionnement des équipements. A nouveau, il est supposé que le processus débute dans un état sous-contrôle dont la loi de fiabilité est connue (distribution de Weibull). Des inspections ont lieu après  $h$  heures de production pour vérifier que le processus n'est pas devenu hors-contrôle. La caractéristique mesurée est reportée sur une carte de contrôle. Parfois, entre deux échantillonnages ( $j$  et  $j+1$ ), une défaillance survient et provoque un passage à un état hors-contrôle. Le processus continue et la carte de contrôle ne permet une détection du problème qu'au  $(j+i)$  échantillonnage. Le modèle de maintenance « adaptative » est illustré à la figure 1. En fait, trois scénarii différents sont proposés. Dans le premier, l'état hors-contrôle est détecté et une maintenance corrective est organisée pour remettre le processus sous contrôle. Dans le second, l'état hors-contrôle n'est pas décelé avant la maintenance préventive planifiée. C'est donc l'opération de maintenance qui met en évidence la défaillance et qui permet de remettre le système sous contrôle. Dans le troisième scénario, le processus reste sous contrôle (pas de défaillance) jusqu'à ce que l'on effectue une opération de maintenance

préventive. Au prix de certaines hypothèses (maintenance AGAN, fonction de perte de Tagushi,...), l'article démontre qu'un modèle intégrant le contrôle qualité et la maintenance peut être bénéfique.

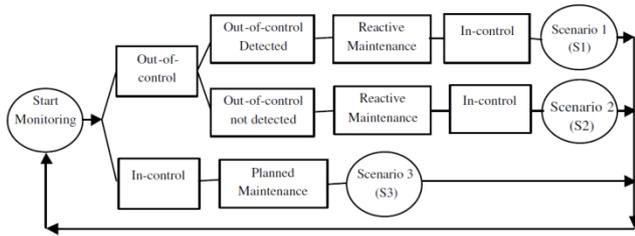


Fig. 1. Principe de simulation [3]

Nous pouvons également citer Alsyouf [4] qui a démontré les bénéfices d'une politique de maintenance sur la qualité des produits (et donc sur la rentabilité). Il a prouvé que la mise en place d'une politique de maintenance efficace réduisait les défaillances, les coûts opératoires et améliorait la qualité des produits. L'avantage de cet article est qu'il fournit un cas d'étude industriel (une papeterie suédoise). Cependant, cet article ne se base pas sur un suivi statistique du processus. Il s'agit plutôt d'une application de la TPM basée sur la collecte de diverses données (Temps opératoire prévu, Taux de production prévu, Temps d'arrêt planifiés et non planifiés, produits de mauvaise qualité, ...).

Le travail de Ben-Daya et Duffuaa [5] apporte aussi une contribution importante à l'approche maintenance-qualité. Dans ce travail, les auteurs identifient des liens entre qualité et maintenance. En fait, ils proposent deux approches : l'une se base sur le concept de maintenance imparfaite et l'autre utilise l'approche de Tagushi sur la qualité et la maintenance [6]. L'avantage de la première approche est qu'elle est plus réaliste (maintenance imparfaite au lieu de AGAN ou ABAO). Le principal problème est cependant de déterminer la façon dont les défaillances influencent la qualité des produits.

Plus récemment, d'autres documents ont été publiés sur le sujet. Dans la suite de cette revue bibliographique, nous nous intéresserons aux documents les plus récents.

Dans le travail de Lu [7], les auteurs proposent un modèle où l'amélioration de la qualité des produits intervient dans la prise de décision d'une maintenance préventive. En fait, les pertes économiques dues aux produits de mauvaise qualité sont intégrées dans le coût total, qui est minimisé pour obtenir le meilleur planning pour les opérations de maintenance préventive. Un cas d'étude montre ensuite que le modèle permet d'atteindre une meilleure performance économique qu'une maintenance préventive traditionnelle. Dans ce papier, le problème concerne une seule machine soumise à une dégradation diminuant la qualité des produits et augmentant le taux de défaillance. Lorsqu'une défaillance apparaît, une opération de maintenance corrective restaure la machine dans l'état avant défaillance (ABAO). La maintenance préventive a lieu lorsque le taux de défaillance atteint un seuil. Cette maintenance diminue le taux de défaillance et améliore la qualité des produits. C'est une maintenance imparfaite (entre

AGAN et ABAO). Dans le modèle, il est considéré que la dégradation de la qualité des produits est un processus aléatoire qui peut être modélisé par un processus Gamma (variable  $X(t)$ ). En ce qui concerne la fiabilité de la machine, les auteurs utilisent la loi de Weibull. Ils obtiennent ainsi la forme analytique du taux de défaillance. Ensuite, pour l'optimisation, une somme de coûts est calculée (maintenances et qualité). Pour la qualité, le coût généré est basé sur la fonction de perte de Tagushi mais le coût est adapté en intégrant la variable  $X(t)$  générée par le processus Gamma. En minimisant le coût total, il est possible de déterminer le seuil du taux de défaillance à appliquer pour la maintenance préventive.

Dans le papier de Rivera-Gomez [8], on s'intéresse aussi à une optimisation économique d'un système de fabrication sujet à la dégradation. Cette dégradation engendre des défauts (non-qualité) dans les produits. Des révisions permettent d'atténuer les effets des dégradations. Le but poursuivi est ici de déterminer la fréquence à laquelle il faut effectuer les révisions. Il s'agit d'un modèle assez général dans lequel les coûts engendrés reprennent les réparations, les révisions, les arriérés de production, les défauts, les coûts de production et les coûts de sous-traitance. Ici, lorsque la machine de production n'est plus capable de fournir le produit au client (à cause de défaillance ou de mauvais produits), on fait appel à une seconde machine pour la fabrication (sous-traitance). Cette seconde machine a cependant un coût plus important que la première et on évitera donc de s'en servir trop fréquemment. L'optimisation économique vise à déterminer la meilleure politique de maintenance (révision) et la meilleure utilisation de l'option sous-traitance (seconde machine). Le système de production évolue suivant un processus semi-markovien, revient en condition ABAO après une maintenance corrective (réparation) et devient AGAN après une maintenance préventive. Les auteurs utilisent par ailleurs une corrélation entre la dégradation de la qualité des produits et l'âge de la machine. Le taux de pièces défectueuses est directement lié à l'âge de la machine. Un exemple numérique est traité pour conclure l'article. Celui-ci expose la méthode et propose même une analyse de sensibilité des coûts.

Dans le papier de Gouiaa-Mtibaa [9], des modèles intégrant les effets d'une non-qualité et d'une politique de maintenance préventive sont développés. L'objectif poursuivi est de déterminer une stratégie optimale de maintenance et de contrôle qualité en tenant compte d'un taux de perte de qualité et de l'impact des activités de reprise des mauvais produits. Deux stratégies différentes sont proposées. Dans la première, les lots de produits sont vendus à un prix réduit à cause de la perte progressive de qualité due à la dégradation de la machine. L'objectif est alors de déterminer le nombre optimal de lots à produire ( $N_1$ ) avant chaque opération de maintenance préventive en maximisant le bénéfice total par unité de temps ( $PT_1$ ). La deuxième stratégie propose de retravailler tous les produits de mauvaise qualité en vue de les vendre au prix maximal  $P_{max}$ . Ici, on désire déterminer le nombre de lots produits et retravaillés ( $N_2$ ) avant chaque opération de maintenance préventive en vue de maximiser le bénéfice total

par unité de temps ( $PT_2$ ). Si une défaillance survient entre les maintenances préventives, une opération de maintenance corrective est effectuée. L'avantage de ce travail est qu'il lie directement l'action de maintenance préventive à la dégradation de la qualité d'un produit (lot de produits). L'approche est originale mais elle n'utilise pas un contrôle statistique de la qualité des produits. Elle se base plutôt sur un taux de perte de qualité (pris constant dans l'exemple numérique traité).

Le travail de Azadeh [10] a pour but de déterminer la meilleure politique de maintenance pour minimiser la moyenne du coût total par unité de temps (coûts maintenance et coûts qualité). Ici, on considère l'utilisation de stocks tampons pour répondre à la demande malgré les pannes ou les maintenances préventives. Le système étudié est illustré à la figure 2. Il s'agit d'une série de machines de production séparées par des stocks tampons pour assurer un fonctionnement continu. Chaque machine fabrique un certain taux de produits non conformes. La taille des stocks intermédiaires peut être variable. Le problème est modélisé par une simulation et les valeurs des stocks tampons et des seuils de non conformité sont déterminés pour obtenir le coût total moyen minimal en utilisant la méthode de Taguchi. Ici, les opérations de maintenance préventive sont effectuées lorsque le taux de produits non conformes atteint un certain seuil et les opérations de maintenance corrective sont menées lorsque le taux de produits non conformes dépasse un autre seuil. La taille des stocks tampons intervient aussi car les coûts de stockage dépendent du nombre d'articles présents dans le stock. Il est supposé que le taux d'articles non conformes augmente de manière aléatoire suivant une relation établie. Pour étudier le comportement du système et générer différents scénarii, les auteurs ont utilisé ici le logiciel de simulation Rockwell automation Arena. Un cas d'étude est ensuite développé sur deux machines de production.

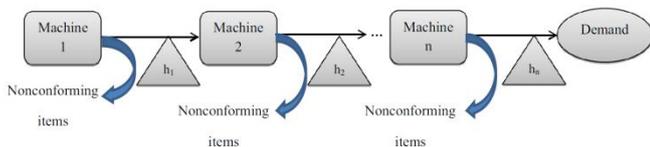


Fig. 2. Ligne de production étudiée [10]

Dans le papier de Chen [11], l'auteur développe un modèle intégrant maintenance et qualité des produits. L'originalité apportée est la prise en compte de l'existence d'erreurs dans la maintenance préventive et de la possibilité de retravailler un certain pourcentage des produits de mauvaise qualité. Ici, la maintenance préventive est appliquée lorsque le système est sous-contrôle. Une maintenance préventive efficace résulte en un taux de défaillance réduit pour la machine. Par contre, il y a une certaine probabilité pour que cette opération de maintenance soit inappropriée et provoque le changement du système vers un état hors-contrôle. Des inspections ont lieu pour déterminer l'état du système de production et la qualité des produits. Cependant, ces inspections ont un coût et l'un des objectifs du modèle est d'optimiser le planning des inspections. L'optimisation économique passe par la

minimisation du coût total. Ce dernier comprend le coût d'installation, le coût du stockage, le coût des reprises des produits non conformes et celui de leur mise au rebut éventuelle, le coût des inspections et de la maintenance préventive et enfin un coût de délai de remise en service.

Le document de Pravin [12] décrit un modèle intégrant la maintenance et la qualité appliqué à une production par lot. En fait, ce modèle étudie la production d'un ensemble de pièces fabriquées par fonderie sous pression. Ici, un contrôle qualité est effectué pour déterminer si les pièces produites sont conformes ou non conformes. Le système produit un taux  $P_1$  de pièces conformes lorsqu'il est sous contrôle et un taux  $P_2$  lorsqu'il est hors contrôle. Le passage de l'état sous contrôle à l'état hors contrôle se produit lorsqu'il y a une défaillance au niveau d'un des composants de la machine. La maintenance est corrective lorsqu'une défaillance est détectée. Toutefois, lorsqu'on change le type de pièce produite (changement de moule), on profite de l'occasion pour appliquer une maintenance préventive si nécessaire. L'optimisation débouche sur la détermination des meilleurs paramètres pour le contrôle qualité et des meilleures stratégies de maintenance à appliquer sur les composants du système de production. Le modèle développé est très intéressant dans le cadre d'une optimisation du contrôle qualité et de la maintenance.

Pour synthétiser cette revue de la littérature, nous exposons dans ce paragraphe les avantages et inconvénients des modèles proposés dans les articles présentés. Beaucoup d'articles combinent une maintenance corrective et une maintenance préventive sur une machine mono-composant (Cassady [2], Linderman [3], Ben-Daya et Duffuaa [5], Lu [7], ...). Cependant, ces modèles ne répondent pas à la problématique d'une machine complexe constituée de plusieurs composants différents. De plus, les maintenances préventives ont des périodes que l'on fait varier pour en trouver la meilleure. En réalité, les périodes de maintenance préventive peuvent être fixées par des événements extérieurs (changements d'outil, arrêt de la production,...) Le terme maintenance opportuniste est utilisé pour décrire cette situation. Nous avons voulu étudier cette situation particulière et nous nous sommes donc basés sur ce document de Pravin [12] pour élaborer notre premier modèle. Cependant, dans ce document, les auteurs s'appuient sur un algorithme génétique et sur la méthode du recuit simulé (simulated annealing). Ici, nous allons plutôt effectuer la simulation en utilisant la méthode de Monte Carlo. En fait, dans l'article de Pravin [12], la maintenance préventive (menée lors d'une opportunité) est effectuée sur base de l'âge effectif des composants. Ici, nous allons tester différentes stratégies de maintenance préventive (par tirage aléatoire) et nous allons les comparer pour en déterminer la meilleure. Nous allons aussi nous baser sur les éléments des contrôles qualité effectués dans les travaux de Cassady [2] et Lindermann [3].

### III. DESCRIPTION DU MODÈLE

L'objectif du modèle est de déterminer la meilleure politique de maintenance et les meilleurs paramètres pour le contrôle qualité dans le cas d'une production par lot. Pour la maintenance, au plus nombreuses seront les opérations, au moins il y aura de défaillances (donc moins de produits non conformes). Par contre, les coûts de maintenance augmenteront. Il y a donc un optimum à déterminer. Pour le contrôle qualité, au plus fréquents seront les échantillonnages, au plus tôt seront détectées les défaillances et donc, il y aura moins de produits non conformes. De plus, la prise de grands échantillons ( $N_s$ , grand) augmente la précision des détections (le risque de ne pas détecter une défaillance diminue lorsque  $N_s$  augmente). A nouveau, un optimum est à déterminer pour les paramètres du contrôle qualité.

Le modèle réalisé s'applique à une production par lot où  $m$  produits différents sont produits sur une même machine. Cette machine est elle-même constituée de  $n$  composants différents. Un modèle permet de déterminer la meilleure politique de maintenance préventive et les meilleurs paramètres pour le contrôle qualité pour une séquence de production donnée.

#### A. Définitions des paramètres

Ci-après (Table I), nous définissons les paramètres intervenant dans le modèle

TABLE I. PARAMÈTRES DU MODÈLE

Caractéristiques	Définitions
$n$	Nombre de composants de la machine
$m$	Nombre de lots produits
$T_{job}$	Temps de réalisation d'un job (ou lot) (h)
$MTTRA$	Temps de remplacement d'un composant (h)
$MTTrA$	Temps de réparation d'un composant (h)
$RF$	Facteur de réparation d'un composant
$\beta$	Paramètre de forme de la loi de Weibull d'un composant
$\eta$	Paramètre d'échelle de la loi de Weibull d'un composant (h)
$PR$	Taux de productions (produits/h)
$CLP$	Coût des pertes de production (€/produit)
$CLM$	Coût de la main d'œuvre en maintenance (€/h)
$CP$	Coût de production d'un produit (€)
$CC$	Coût d'un composant neuf (€)
$CSP$	Coût des pièces de rechange (€)
$P_1$	Taux de produits défectueux lorsque le système est sous contrôle
$P_2$	Taux de produits défectueux lorsque le système est hors de contrôle
$H_s$	Période d'échantillonnage (h)
$N_s$	Nombre d'échantillons
$C_{ech}$	Coût d'un échantillon (€)

#### B. Méthodologie

La méthodologie est exposée à la figure 3. Après avoir choisi les données, la première étape consiste en l'élaboration d'une stratégie de maintenance préventive. Pour cela, on tire aléatoirement une stratégie de maintenance. Par composant, on se fixe un remplacement durant la production des  $m$  lots et

autant de réparations que l'on veut. Cependant, une réparation ne peut intervenir quand un remplacement est planifié. La définition de la stratégie de maintenance concerne les  $n$  composants de la machine. Au terme de la production d'un lot, cette stratégie nous informe de l'opération de maintenance qui va être effectuée sur les composants : remplacement, réparation ou aucune opération. Cette stratégie de maintenance se présente comme une matrice  $n \times m$ . Par exemple, pour une machine à 2 composants qui fabrique 3 lots différents, une stratégie de maintenance  $M$  typique serait la suivante :

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Dans cette matrice, le chiffre 0 indique qu'aucune opération de maintenance n'est effectuée. Le chiffre 1 indique qu'une réparation est prévue. Enfin, le chiffre 2 indique qu'un remplacement est planifié. Ainsi, dans la matrice  $M$  présentée ci-avant, le composant 1 de la machine (première ligne) sera remplacé à la fin du deuxième job et réparé à la fin du troisième job. Par contre, le second composant de la machine sera réparé à la fin du premier job et remplacé à la fin du troisième job.

Ensuite, la production successive des lots est lancée. Durant la production d'un lot, une défaillance peut apparaître. Celle-ci mène à une réparation du composant défaillant. A la fin de la production du lot, la stratégie de maintenance est appliquée à la machine. Puis, la production du lot suivant commence et ainsi de suite jusqu'à la fin des  $m$  jobs. A la fin des  $m$  jobs, le coût total de la production des lots est calculé (production, maintenance et contrôle qualité).

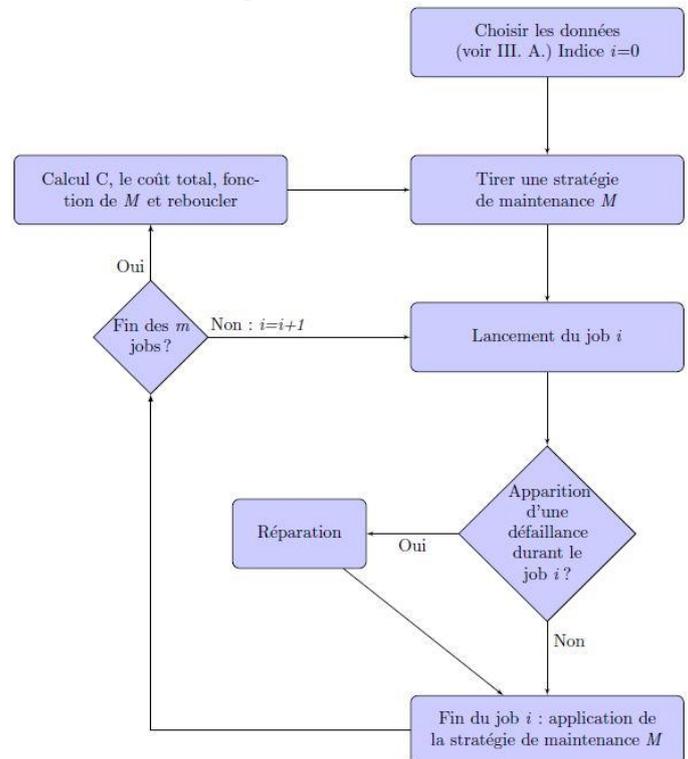


Fig. 3. Méthodologie utilisée

Nous devons encore savoir comment détecter les défaillances. En effet, leur détection est importante car ces défaillances entraînent une augmentation du taux de produits non conformes ainsi qu'une réparation pour remettre le système sous contrôle. Cette détection est réalisée via un contrôle qualité. Le principe utilisé pour la simulation est illustré à la figure 4. Les paramètres du contrôle qualité sont premièrement fixés ( $N_s, H_s, C_s, \dots$ ). Ensuite, une simulation de Monte Carlo est effectuée : on détermine les temps de défaillance de chacun des  $n$  composants. Pour cette simulation, nous utilisons la loi de fiabilité de Weibull dont l'expression est rappelée à l'équation 1.

$$R(t) = e^{\left(\frac{-t}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

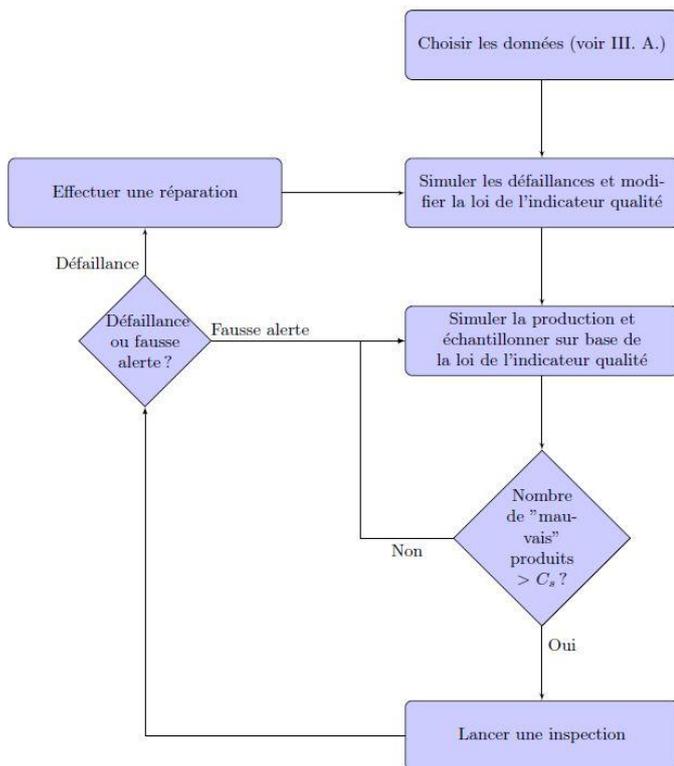


Fig. 4. Contrôle qualité (principe de la simulation)

Il est supposé que l'indicateur qualité suit une loi normale et que l'apparition d'une défaillance déplace la moyenne de la loi normale. Cette modification de la moyenne entraîne une augmentation du taux de produit non conforme (passage de  $P_1$  à  $P_2$ ). La carte de contrôle utilisée est une carte de Shewhart à la moyenne. La simulation de production commence ensuite. Durant la production des lots, un contrôle qualité est réalisé. En fait, on prélève  $N_s$  produits (échantillons) à intervalle de temps  $H_s$  (période d'échantillonnage). Ce prélèvement est effectué par tirage aléatoire sur les lois normales précitées. Si le nombre de produits défectueux dépasse un certain seuil  $C_s$ , une inspection est lancée pour déterminer si un problème est apparu. Si une défaillance est apparue, une réparation est effectuée. Le but du contrôle qualité est de détecter les défaillances et ainsi éviter la production prolongée de produits

non conformes. En effet, l'apparition d'une défaillance provoque l'augmentation du taux de produits non conformes fabriqués et donc, l'augmentation des coûts liés à la non qualité.

#### IV. APPLICATION NUMÉRIQUE

Nous allons traiter un exemple proche de celui proposé dans l'article de Pravin [12]. Il s'agit d'une machine de fonderie sous pression. Elle fabrique une série de produits identiques puis le moule est modifié et la machine produit alors d'autres pièces. Nous avons besoin de définir une série de paramètres (voir tableau). Nous nous limiterons ici à 5 composants. Les 5 composants retenus sont ceux dont les défaillances entraînent des défauts de qualité dans les pièces produites. Nous avons :

- 1) Piston
- 2) Joint
- 3) Soupape
- 4) O-ring
- 5) Raccords

##### A. Définitions des données

Pour chacun de ces composants, nous définissons les paramètres de la loi de Weibull ( $\beta, \eta$ ), les temps moyens de remplacement et de réparation (MTTRA et MTTrA), les facteurs de réparation RF, les coûts d'achat (CC) et les coûts de pièces de rechange (CSP).

TABLE II. CARACTÉRISTIQUES DES COMPOSANTS

Caractéristiques	Composants				
	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5
$\beta$	2.69	2.83	3.01	3.33	2.49
$\eta$ (h)	3744	1837	36023	14027	7738
MTTRA (h)	6	4	1	13	1
MTTrA (h)	5	1	1	2	5
Facteur RF	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3
CC (€)	120000	50000	10000	40000	16200
CSP (€)	50000	4000	500	2000	1000

Le facteur de réparation RF permet de définir le paramètre  $\rho$ , appelé efficacité de la maintenance (Eq. 2). L'efficacité de la maintenance servira lors des réparations à trouver l'âge effectif du composant (maintenance imparfaite, Eq. 3).

$$\rho = 1 - RF \quad (2)$$

$$v' = v + \rho T \quad (3)$$

Dans l'équation 3,  $v'$  symbolise l'âge après la réparation et  $v$  représente l'âge avant la période de production T.

Nous avons aussi besoin de définir d'autres paramètres concernant les produits. Ces paramètres serviront à l'établissement du coût total engendré par une stratégie donnée. Nous considérerons ici que la machine fabrique 5 produits différents ( $m=5$ ) mais dont les caractéristiques sont les mêmes.

TABLE III. CARACTÉRISTIQUES DES PRODUITS

Caractéristiques	Valeurs
PR	150
CLP	50
CLM	30
CP	100
P <sub>1</sub>	0.05
P <sub>2</sub>	0.3
H <sub>s</sub>	50
T <sub>inspection</sub>	0.2
C <sub>ech</sub>	10

### C. Hypothèses

Certaines hypothèses ont été prises pour réaliser notre modèle :

- Etant donné leurs durées de vie moyennes (par rapport aux temps de réalisation des jobs), les composants ne peuvent subir qu'une défaillance durant la réalisation des  $m$  jobs
- La détection d'une défaillance entraîne une réparation du composant concerné
- Lorsque le système est sous contrôle, le taux de produits défectueux est constant et vaut  $P_1$
- Lorsque le système est hors de contrôle (une défaillance est apparue), le taux de produits défectueux est constant et vaut  $P_2$
- Les ressources nécessaires pour les actions de maintenance sont toujours disponibles
- Le facteur de réparation RF est connu pour chacun des composants de la machine
- Les temps de production de chacun des jobs sont connus

### D. Développements

Ici, nous allons développer la méthode pour notre exemple. La première étape est de tirer aléatoirement une stratégie de maintenance. La stratégie de maintenance est donc présentée ici sous forme d'une matrice  $5 \times 5$ . Chaque ligne correspond à la stratégie de maintenance d'un composant.

Ensuite, il faut réaliser une simulation de Monte Carlo. Grâce à cela, les temps de défaillance des 5 composants sont connus. La réalisation successive des 5 jobs commence, c'est-à-dire que la production des 5 produits est lancée. Durant la fabrication d'un produit, nous regardons si une défaillance survient. Pour le savoir, il suffit de comparer les temps de défaillance au temps de fin du job. En réalité, c'est le contrôle qualité qui va nous permettre de détecter les défaillances. En fait, la défaillance entraîne un changement du taux de produits défectueux. Or, des échantillons de  $N_s$  produits sont prélevés à intervalle de temps  $H_s$ . Lorsque la proportion de produits défectueux parmi ceux prélevés dépasse  $C_s$  (limite acceptable du client), une inspection est lancée pour vérifier si la machine est dans un état normal. Si une défaillance est apparue, elle sera détectée grâce à l'inspection. Une réparation est alors effectuée.

Enfin, à la fin d'un job, la stratégie de maintenance préventive est appliquée. Pour moyenniser les résultats de la

stratégie choisie, la simulation de Monte Carlo est répétée un grand nombre de fois (10000 par exemple). L'opération est répétée sur plusieurs stratégies différentes de manière à trouver la meilleure stratégie.

### E. Résultats

Dans cette section, nous avons testé 100 stratégies de maintenance  $M$  tirées aléatoirement. Pour chacune d'entre elles, nous avons fait varier  $N_s$  entre 1 et 100 afin d'en déterminer l'optimum. Enfin, pour chaque couple  $M-N_s$ , nous avons effectué 10000 simulations de Monte Carlo.

La meilleure stratégie de maintenance trouvée est la suivante :

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Cela signifie que le composant 1 ne doit pas être réparé mais seulement remplacé à la fin du 5<sup>ème</sup> job. Le composant 4 doit être réparé à la fin des 1<sup>er</sup>, 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> jobs et remplacé à la fin du job 4...

Le meilleur nombre d'échantillons à prélever est donné à l'équation 4. Ce couple  $M-N_s$  donne un coût total  $C_{tot}$  donné à l'équation 5.

$$N_s = 20 \quad (4)$$

$$C_{tot} = 998900 \text{ €} \quad (5)$$

Le nombre de simulations de Monte Carlo influence fortement la précision du coût total. Sur la figure 5, nous pouvons ainsi constater qu'en dessous de 2000 simulations, le coût fluctue de manière importante. En effectuant 10000 simulations, la convergence est assurée.

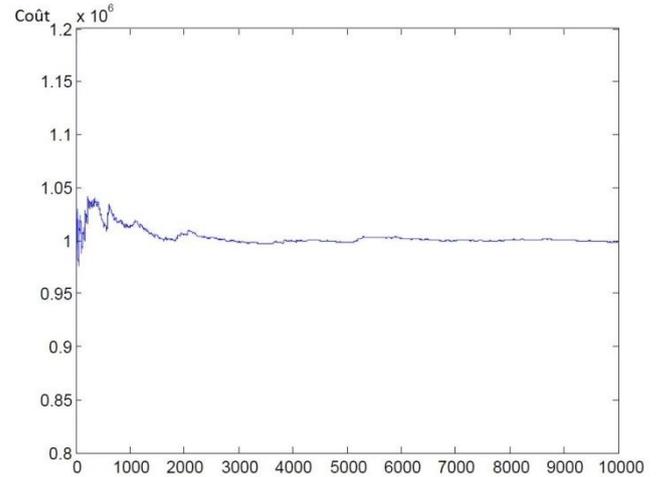


Fig. 5. Evolution du coût total en fonction du nombre de simulations

Il y a une grande sensibilité des résultats vis-à-vis de certains paramètres. Par exemple, si le contrôle qualité devient destructif, le coût d'un échantillon deviendra égal au coût de

production de la pièce : 100€. Si la stratégie de maintenance est conservée, cette modification a pour effet de diminuer le nombre d'échantillons optimal  $N_s$ . En effet, une telle modification entraîne un  $N_s$  de 9 comme nous pouvons le constater sur la figure 6. Notons également que cela influence forcément le coût total. Celui est revu à la hausse et vaut : 1029100€. Une augmentation d'environ 30000€ est constatée.

Ensuite, un autre paramètre peut être modifié, il s'agit de la période d'échantillonnage  $H_s$ . Ainsi, en gardant les paramètres de départ ( $C_{ech}=10€$ ) et en posant  $H_s=20h$ , nous remarquons une diminution du coût total. Celui passe à 956080€ pour un  $N_s$  de 21. Cela signifie une économie de 40000€.

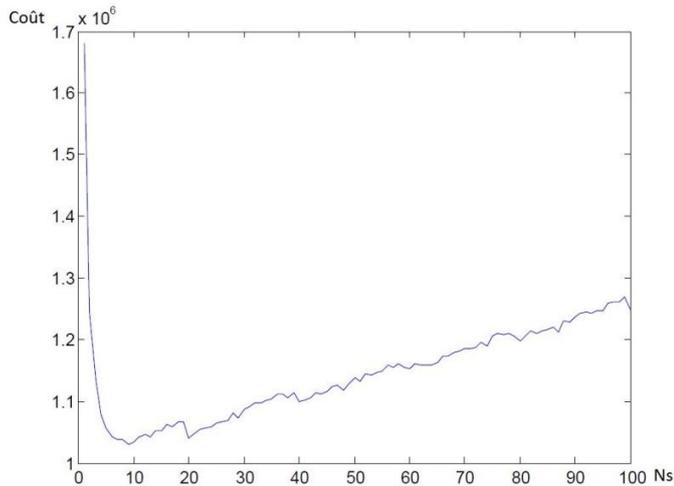


Fig. 6. Evolution du coût total en fonction du nombre d'échantillons

### CONCLUSION

Une étude bibliographique a été réalisée pour rendre compte des techniques et modèles existants sur l'intégration du contrôle qualité dans la définition d'une stratégie de maintenance. Sur base de l'article de Pravin [12], nous avons réalisé un premier modèle intégrant production, maintenance et contrôle qualité. Ce premier modèle permet de définir la meilleure politique de maintenance et le meilleur contrôle qualité à appliquer à une machine multi-composants. Ce modèle peut être appliqué à un système réel dont un historique des temps de défaillance est disponible (ce qui permet une estimation des lois de fiabilité) et dont l'effet des défaillances sur la qualité est connu (saut dans la moyenne de l'indicateur par exemple). L'intérêt est réel vu que le modèle donne la meilleure stratégie de maintenance à appliquer. De plus, il fournit un plan de contrôle ( $H_s$ ,  $N_s$ , inspection lancée si détection d'une non conformité). Sur le système réel, il reste à définir le défaut (dimension hors tolérance, défaut visuel,...) et la méthode de mesure. Ce modèle a déjà une certaine

complexité puisqu'il permet d'étudier un système complexe (multi-composant) et qu'il intègre de nombreux paramètres (maintenance imparfaite, carte de contrôle, coûts divers,...). Cependant, le modèle peut encore être amélioré. En effet, ici, nous avons supposé que les ressources pour la maintenance sont toujours disponibles. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas en réalité et il faut en tenir compte. Ensuite, il existe beaucoup de carte de contrôle différentes (Shewhart, CUSUM,...), nous pourrions nous inquiéter de la meilleure carte à appliquer pour le contrôle qualité. Les limites de contrôle ont définies de manière arbitraire, il faudrait aussi les optimiser. Ici, de nombreuses inspections ont été lancées inutilement.

### REFERENCES

- [1] A. Ollila et M. Malimpuro. *Maintenance has a role in quality*. The TQM Journal 11 (1999) 17-21
- [2] R. Cassady, R. Bowden, L. Liew et E. Pohl. *Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation*. IIE Transactions (2000) 32, 471-478
- [3] K. Linderman, K. McKone-Sweet et J. Anderson. *An integrated systems approach to process control and maintenance*. European Journal of Operational Research 164 (2005) 324-340
- [4] I. Alsyouf. *The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability*. International Journal of Production economics 105 (2007) 70-78
- [5] M. Ben-Daya et S. Duffuaa. *Maintenance and quality: the missing link*. Journal of Quality in Maintenance Engineering 1 (1995) 20-26
- [6] M.A. Rahim et M. Ben-Daya. *Integrated models in production planning, inventory, quality and maintenance*. Springer US. (2001)
- [7] Biao Lu, Xiaojun Zhou et Yanting Li. *Joint modeling of preventive maintenance and quality improvement for deteriorating single-machine manufacturing systems*. Computers & Industrial Engineering 91 (2016) 188-196
- [8] Héctor Rivera-Gomez, Ali Gharbi, Jean-Pierre Kenné, Oscar Montano-Arango et Eva Selene Hernandez-Gress. *Production control problem integrating overhaul and subcontracting strategies for a quality deteriorating manufacturing system*. Int. J. Production Economics 171 (2016) 134-150.
- [9] Amal Gouiaa-Mtibaa, Sofoene Dellagi, Zied Achour et Walid Erray. *Development of Integrated Maintenance-Quality Policy according to imperfect quality item produced*. IFAC-PapersOnLine 49-12 (2016) 1400-1405
- [10] A. Azadeh, M. Sheikhalishahi, S. Mortazavi, E. Ahmadi Jooghi. *Joint quality control and preventive maintenance strategy: a unique taguchi approach*. Springer (2016).
- [11] Yan-Chun Chen. *An optimal production and inspection strategy with preventive maintenance error and rework*. Journal of Manufacturing Systems 32 (2013) 99-106
- [12] Pravin P. Tambe et Makarand S. Kulkarni. *A superimposition based approach for maintenance and quality plan optimization with production schedule, availability, repair time and detection time constraints for a single machine*. Journal of Manufacturing Systems 37 (2015) 17-32
- [13] Françoise Boulanger, Georges Chéroute et Valérie Jolivet. *Maîtrise statistique des processus – Utilisation des cartes de contrôle*. Techniques de l'Ingénieur (2006)