



HAL
open science

Simulation de Procédés de Fabrication Soumis à la Maintenance et au Contrôle Qualité

Arnaud Lesage, Pierre Dehombreux

► **To cite this version:**

Arnaud Lesage, Pierre Dehombreux. Simulation de Procédés de Fabrication Soumis à la Maintenance et au Contrôle Qualité. QUALITA' 2015, Mar 2015, Nancy, France. hal-01149804

HAL Id: hal-01149804

<https://hal.science/hal-01149804>

Submitted on 7 May 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Simulation de Procédés de Fabrication Soumis à la Maintenance et au Contrôle Qualité

Arnaud Lesage, Pierre Dehombreux
Service de Génie Mécanique
Université de Mons (UMONS) – Faculté Polytechnique
Mons, Belgique
arnaud.lesage@umons.ac.be

Abstract—La plupart des entreprises sont à la recherche de moyens permettant d'accroître l'efficacité de leur production. Les tentatives visant à réduire les coûts globaux de production sont parfaitement en accord avec cet objectif. Cet article propose une approche de modélisation des procédés de fabrication et tente de démontrer les avantages d'une optimisation conjointe des politiques de maintenance et de contrôle qualité. Finalement, un exemple numérique est développé et analysé.

Mots-clés—Simulation de procédés, politique de maintenance, maintenance préventive, contrôle qualité, maîtrise statistique des procédés.

I. INTRODUCTION

Pour la plupart des entreprises, la qualité est devenue une stratégie menant au succès, à la croissance et à la compétitivité. De plus, l'augmentation continue du niveau d'automatisation et de complexité des systèmes de production a fait passer les procédés de production des mains du travailleur aux machines, nécessitant ainsi d'accorder plus d'importance aux aspects surveillance, maintenance, contrôle qualité et coûts de production.

Le lien entre la maintenance et la qualité est bien perceptible : on conçoit qu'un équipement mal entretenu produit de la « non-qualité » et finit par défaillir. Inversement, un contrôle qualité permet de suivre l'état d'un système de production : si un équipement se met à produire de la non-qualité on peut en déduire qu'il se passe quelque chose au niveau de cet équipement qui nécessite une intervention de maintenance.

Bien qu'il n'y ait aujourd'hui pas de lien concret établi entre ces deux aspects très importants, certains papiers (ex. [1-6] et [9]) traitent de la définition de cette corrélation potentielle.

La simulation combinée de données qualité et maintenance n'a été que peu envisagée. Elle constitue un aspect nouveau, dans l'étude de la relation entre Maintenance et Qualité, qui peut être intéressant pour la validation de stratégies ou pour extrapoler une faible quantité de données lors d'une optimisation en début de vie d'une installation.

L'objectif de ce papier est de décrire un modèle de simulation de procédés de fabrication utilisé pour déterminer de manière conjointe les paramètres optimaux de maintenance préventive et de contrôle qualité.

Cet outil de simulation est une évolution du modèle développé par C.R. Cassady [6] qui propose, dans son papier, un modèle basique combinant le contrôle qualité et la maintenance préventive. Notre objectif sera dès lors de compléter ce modèle afin de le rendre plus représentatif des cas pouvant être rencontrés dans la réalité.

II. SIMULATION DE PROCÉDES DE FABRICATION

Afin de construire le modèle d'un procédé de fabrication, certains paramètres concernant les aspects équipement, maintenance et qualité doivent être définis :

A. Equipement industriel

Nous considérons un équipement produisant des articles à une allure de ρ articles par heure de manière continue. Nous faisons l'hypothèse que le procédé peut être évalué en mesurant un indicateur qualité x du produit fini. Cet équipement est soumis à des défaillances dont l'occurrence est gouvernée par une loi de Weibull ayant un paramètre de forme $\beta > 1$ et un paramètre d'échelle $\eta > 0$. Nous faisons également l'hypothèse que la défaillance de l'équipement peut être anticipée au travers de la surveillance de l'indicateur qualité x . L'événement, anticipant une défaillance de l'équipement, peut se traduire de différentes manières au niveau de l'indicateur x :

- *Signal présentant un saut* (Fig. 1). Ce type de signal est courant dans l'industrie, il montre un changement immédiat et brutal dans la production. Ceci peut être expliqué, par exemple, par la défaillance d'une pièce mécanique, un dérèglement suite à un choc, etc.
- *Signal présentant une dérive croissante ou décroissante* (Fig. 2). C'est également une situation courante qui montre une variation progressive dans un processus. Elle peut être associée à un problème d'usure ou à un dérèglement progressif d'un système, etc.
- *Signal présentant une variation progressive correspondant à de petits sauts successifs* (Fig. 3). Ce signal est une variante du « saut ». C'est une succession de petits changements qui provoquent une dérive du paramètre surveillé. Il peut être rencontré, par exemple, lorsque l'usure d'un outil de coupe est surveillée.

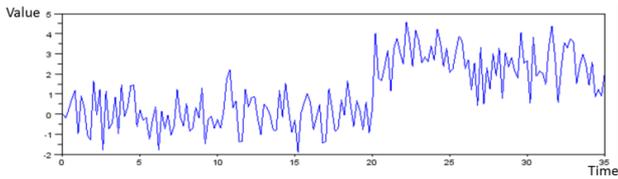


Fig. 1. Signal présentant un saut.

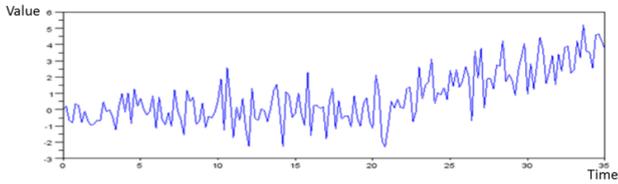


Fig. 2. Signal présentant une dérive croissante.

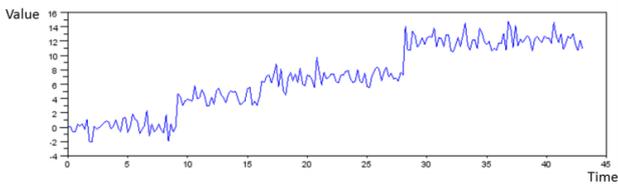


Fig. 3. Signal présentant des sauts successifs.

B. Représentation de l'indicateur qualité

Une réflexion sur les possibilités de simuler des données qualité a conduit aux hypothèses suivantes :

- Il est impossible de reproduire exactement le même produit plusieurs fois. L'indicateur qualité x peut donc être représentée par une loi normale de moyenne μ et d'écart-type σ .
- L'apparition d'une défaillance qui affecte l'indicateur qualité x conduit à une variation observable lors de la mesure de cet indicateur.

C. Stratégie de contrôle qualité et détection des événements

Afin de suivre l'évolution de l'indicateur qualité x , un échantillon de n produits finis est contrôlé toutes les d heures.

Les résultats d'échantillonnage sont alors enregistrés en utilisant une carte de contrôle de type \bar{x} (Fig. 4).

La carte de contrôle est un outil graphique permettant de suivre l'évolution d'un paramètre dans le temps et de vérifier si sa valeur reste dans une plage spécifique. Pour un indicateur x suivant une distribution normale de moyenne μ_0 et d'écart-type

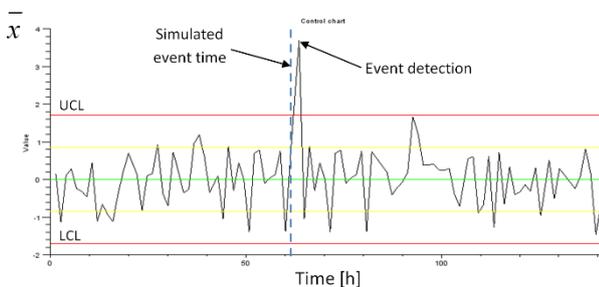


Fig. 4. Carte de contrôle \bar{x} avec détection d'un événement.

σ_0 , la valeur portée dans la carte de contrôle pour chaque échantillon est définie comme suit :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

et la plage acceptable est définie par la limite de contrôle supérieure (UCL) ainsi que la limite de contrôle inférieure (LCL):

$$UCL = \mu_0 + k \cdot \sigma_0 \quad (2)$$

$$LCL = \mu_0 - k \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

où k est le nombre d'écart-types entre la ligne centrale et les limites de contrôle.

Les cartes de contrôle sont également utilisées pour la détection d'occurrences de défauts. La Fig. 4 montre l'exemple d'un dépassement d'une limite de contrôle. Ce cas indique une situation anormale qui nécessite de déclencher une action de QM.

D'autres règles de détection telles que la série, des tendances ou des périodicités existent également mais ne sont pas traitées dans ce document. Des informations complémentaires sur ces règles sont disponibles dans de nombreux ouvrages tels que [7].

D. Politique de maintenance

La stratégie mise en œuvre pour la maintenance de l'équipement considère des actions de Maintenance Préventive (PM) avec une période de τ heures ainsi que des actions de Maintenance Corrective (CM) en cas de défaillance de l'équipement. En outre, nous proposons, dans notre modèle, d'effectuer une « Maintenance basée sur la Qualité » (QM) si un événement inattendu est détecté au travers du contrôle qualité.

On considère que le temps nécessaire pour effectuer une action de PM est plus court que celui d'une action de QM, le temps nécessaire pour effectuer une action de QM est inférieur à celui d'une action de CM et dans tous les cas l'équipement est restauré dans un état « as good as new ».

E. Modèle économique

L'objectif de ces simulations est d'estimer le coût horaire total pour ensuite le minimiser. Pour atteindre cet objectif, nous devons prendre en compte les différents coûts et paramètres relatifs à la politique de maintenance, au contrôle qualité et aux arrêts de production :

- Durées des actions de maintenance : détection d'une fausse alarme (T_1 heures), PM (T_2 heures), QM (T_3 heures) et CM (T_4 heures);
- Coûts des arrêts de production (Cd);
- Coûts d'inspection (Ci);
- Coûts de non-qualité (Cq).

Les coûts de maintenance sont déterminés en utilisant les coûts des arrêts de production et le temps moyen nécessaire en fonction du type de maintenance mise en œuvre (T_1 pour la détection d'une fausse alarme, T_2 pour les actions de maintenance préventive, T_3 pour les actions de maintenance

basée sur la qualité et T_4 pour les actions de maintenance corrective).

Comme nous pouvons l'imaginer, les coûts de non-qualité sont plus difficiles à quantifier que les autres coûts. Taguchi [7] propose une fonction de perte quadratique (Fig. 5) pour caractériser le coût de la non-qualité. Il suppose qu'une perte est toujours engagée lorsqu'un indicateur qualité s'écarte de sa valeur cible. La perte est d'autant plus importante que la valeur de l'indicateur est loin de cette valeur cible. Comme il est impossible de produire de façon répétitive à la valeur cible, la production de chaque élément provoque des pertes économiques. Cette fonction quadratique est définie par :

$$Cq = \gamma \cdot (x - \mu_0)^2 \quad (4)$$

où γ est une valeur constante dépendant du coût de la mise au rebut ou de retraitement du produit.

Cette fonction quadratique est souvent utilisée dans la littérature mais peut être critiquée. En effet, pour un processus dont l'indicateur qualité est soumise à des tolérances, cette fonction entraîne des coûts de non-qualité même si le produit est dans ces tolérances.

En ce sens, l'utilisation de fonctions personnalisées peut être plus appropriée afin de déterminer les coûts de non-qualité en considérant, par exemple, un coût non nul si la pièce est dans les tolérances et un coût fixe si la pièce est hors tolérances. Un exemple d'une telle fonction est présenté à la Fig. 6.

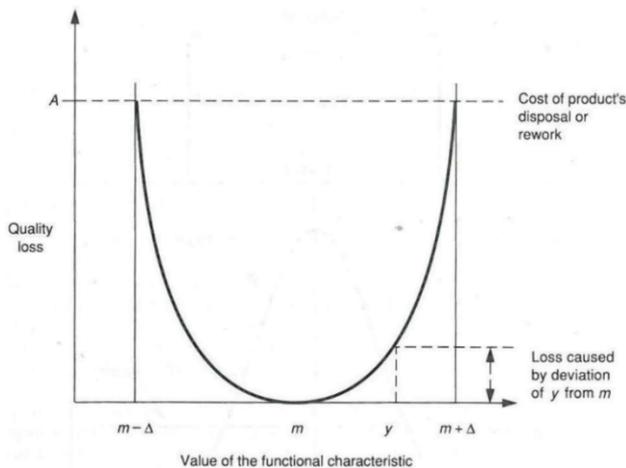


Fig. 5. Fonction de perte quadratique de Taguchi [7].

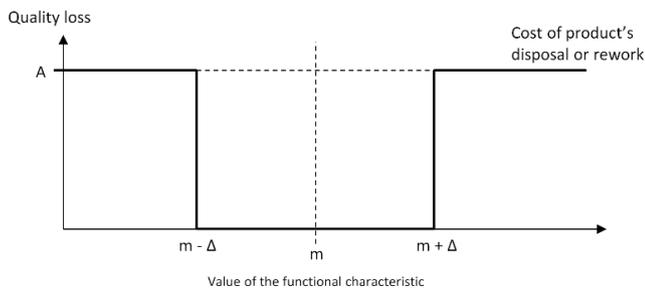


Fig. 6. Exemple de fonction de perte personnalisée.

Dans ce cas, la fonction correspondante est :

$$Cq = 0 \quad \text{si } m - \Delta < x < m + \Delta$$

$$Cq = A \quad \text{si } x < m - \Delta \text{ ou } x > m + \Delta \quad (5)$$

où m est la valeur cible, Δ la distance entre la valeur cible et les limites de contrôle et A le coût de la mise au rebut ou du retraitement.

En fonction des cas étudiés, le simulateur permet d'utiliser soit la fonction de perte quadratique de Taguchi ou des fonctions personnalisées.

F. Schéma de fonctionnement du modèle de simulation

Afin de résumer les principes de simulation, le schéma de fonctionnement global du procédé de simulation est représenté à la Fig. 7.

III. RESULTATS DE SIMULATION ET EXEMPLE NUMERIQUE

Afin de montrer l'intérêt du modèle, il est intéressant d'examiner une étude de cas crédible. Dans cet exemple, notre objectif sera de trouver la meilleure combinaison de la période de maintenance préventive τ et de la période d'échantillonnage d afin de minimiser le coût horaire global.

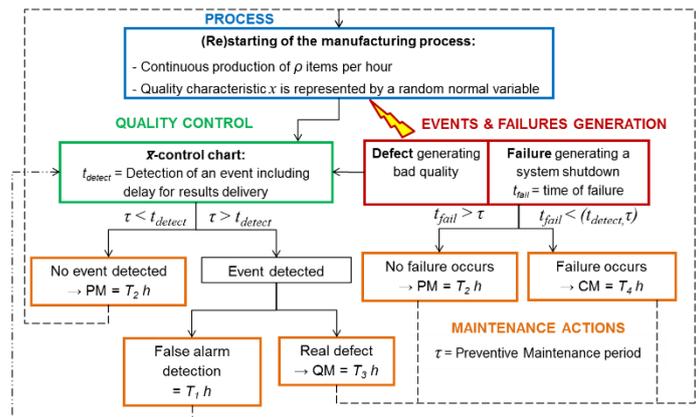


Fig. 7. Schéma de fonctionnement de la simulation.

L'équipement produit à une cadence constante et est soumis à des défauts qualité anticipant des défaillances mais aussi à des défaillances soudaines. Dans le même temps, l'indicateur qualité est surveillé afin de détecter des événements inattendus qui pourraient mener à un processus hors de contrôle. Si aucun événement n'est détecté avant le moment prévu pour la PM, une action de PM est menée. Si une défaillance intervient sans qu'un événement soit détecté, une action de CM est déclenchée. Finalement, si un événement est détecté au travers du contrôle qualité et que le problème est confirmé, une action de QM est mise en œuvre.

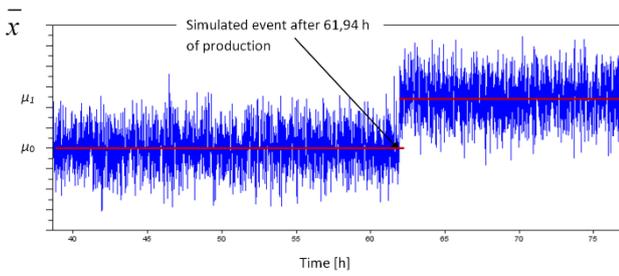


Fig. 8. Evènement précédent l'occurrence d'une défaillance.

TABLEAU 1. COÛTS SPECIFIQUES ET DUREE DES ACTIONS DE MAINTENANCE

Paramètre	Valeur
Coût d'inspection – C_i	7 €/article
Coût d'un arrêt de production – C_d	3500 €/h
Coût de non-qualité – C_q	100 €/mauvais article
Temps pour détecter une fausse alarme – T_1	0,1 h
Temps pour réaliser une action de PM – T_2	1 h
Temps pour réaliser une action de QM – T_3	3 h
Temps pour réaliser une action de CM – T_4	4 h

Afin d'illustrer le type de résultats fournis par le simulateur, nous étudions un procédé simple défini comme suit. Le processus est un processus continu produisant des pièces à une cadence ρ de 100 articles par heure. La fiabilité du système simulé suit une distribution de Weibull avec $\beta = 2$ et $\eta = 80$ heures. L'indicateur qualité est une variable aléatoire suivant une loi normale de moyenne $\mu_0 = 100$ et d'écart-type $\sigma_0 = 5$. Les défaillances de l'équipement sont précédées d'un saut de la moyenne de l'indicateur qualité de μ_0 à $\mu_1 = 110$ et l'écart-type reste inchangé (Fig. 8).

La taille de l'échantillon n et le paramètre k , qui est représentatif de la distance entre la ligne centrale de la carte de contrôle et les limites de contrôle sont respectivement fixés à 3 articles et à 3.

En ce qui concerne les paramètres du modèle économique, les différents coûts et les durées de maintenance sont définis dans le Tableau 1.

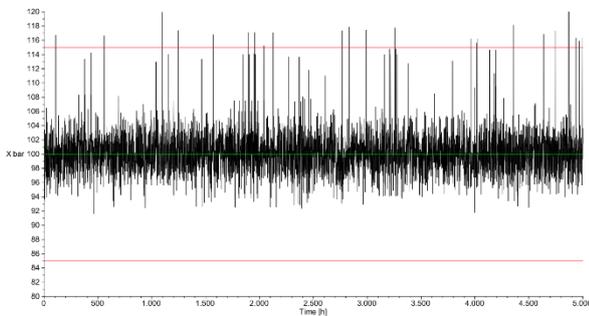


Fig. 9. Carte de contrôle (simulation de 5000 heures).

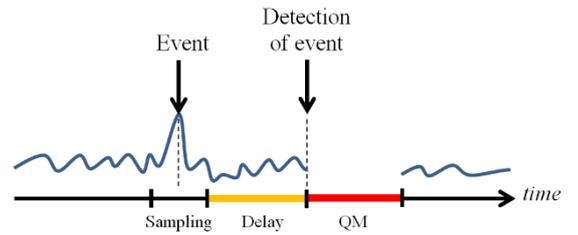


Fig. 10. Délai pour l'obtention des résultats du contrôle qualité.

Un exemple de carte de contrôle \bar{x} fourni par le simulateur pour cet ensemble de paramètres et pour une simulation de 5000 heures est illustré à la Fig. 9. Nous pouvons voir des dépassements de la limite de contrôle supérieure dus à des sauts de moyennes de μ_0 à μ_1 .

Dans les procédés industriels réels, il est très fréquent que les résultats des tests effectués sur des échantillons ne soient pas délivrés de manière instantanée. Par conséquent, il semble intéressant d'inclure un délai pour l'obtention des résultats comme le montre la Fig. 10. Si un événement apparaît, il est seulement détecté quelques minutes ou quelques heures plus tard. Nous considérerons, pour l'étude qui nous intéresse, un délai de 2 heures.

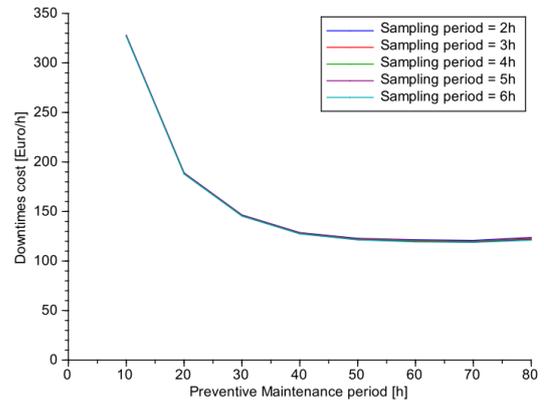


Fig. 11. Coût des arrêts par heure.

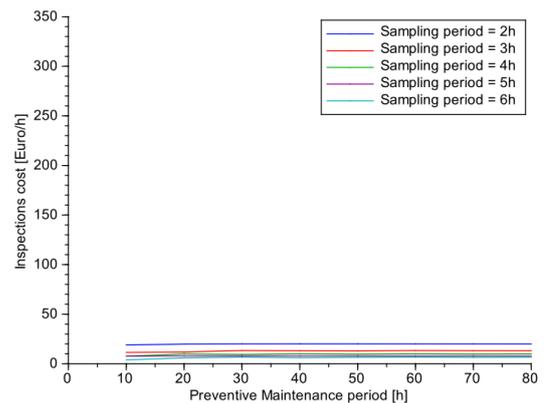


Fig. 12. Coût des inspections par heure.

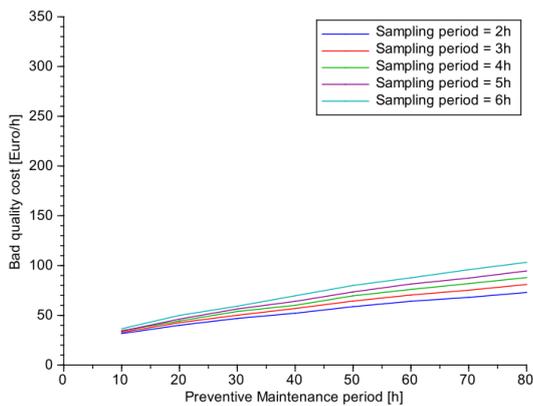


Fig. 13. Coût de non qualité par heure.

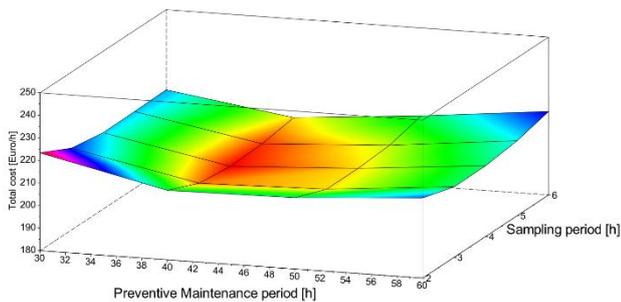


Fig. 14. Coût total par heure.

Les Fig. 11-13 montrent l'évolution des coûts spécifiques en fonction de la période de maintenance préventive τ et de la période d'échantillonnage d devant être optimisés. La Fig. 19, quant à elle, représente le coût horaire total qui n'est rien d'autre que la somme des coûts spécifiques. Notons que la zone autour du point représentant le coût minimum ($d = 4$ heures et $\tau = 40$ heures) est relativement plate dans le cas de cette étude. Par conséquent, le fait de modifier légèrement les paramètres τ et d autour de ce minimum n'influencera pas de manière significative le coût horaire total. Cela permet une certaine flexibilité dans le choix final des paramètres de maintenance préventive et de contrôle qualité.

IV. CONCLUSIONS

L'avantage d'établir un lien entre la politique de maintenance et la qualité des produits fabriqués est évident si l'on admet qu'un équipement mal entretenu engendre de la mauvaise qualité.

C'est particulièrement vrai si la non-qualité mène à d'importantes pertes financières dans le cas de produits à grande valeur ajoutée.

Pour envisager des solutions aux « problèmes de qualité », la modélisation des processus est essentielle. Ce document fournit un modèle de simulation qui permet, sous certaines hypothèses, d'optimiser conjointement les paramètres de maintenance et de contrôle qualité et qui tente d'être le plus proche possible de la réalité industrielle. Ce modèle se distingue du modèle développé de C.R. Cassady [6] en proposant diverses évolutions possibles de l'indicateur qualité, en intégrant un délai d'obtention pour les résultats du contrôle qualité et en permettant l'utilisation de fonctions de coûts personnalisées.

REFERENCES

- [1] M. Ben-Daya and S.O. Duffuaa, Maintenance and quality: the missing link, *Journal of quality in maintenance engineering*, Vol. 1, Nr. 1, pp. 20-6, 1995.
- [2] S.O. Duffuaa and M. Ben-Daya, Improving maintenance quality using SPC tools, *Journal of quality in maintenance engineering*, Vol. 1, Nr. 2, pp. 25-33, 1995.
- [3] H.N. Chiu and B.S. Huang, The economic design of \bar{x} and S2 control charts with preventive maintenance and increasing hazard rate, *Journal of quality in maintenance engineering*, Vol. 1, Nr. 4, pp. 17-40, 1995.
- [4] L.F. Hsu and S. Kuo, Design of optimal maintenance policies based on on-line sampling plans, *European Journal of Operational Research*, Nr. 86, pp. 345-357, 1995.
- [5] M. Ben-Daya and M.A. Rahim, Effect of maintenance on the economic design of \bar{x} -control-chart, *European Journal of Operational Research*, Nr. 120, pp. 131-143, 2000.
- [6] C.R. Cassady, R.O. Bowden, L. Liew and E.A. Pohl, Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation, *IIE Transactions*, Nr. 32, pp. 471-478, 2000.
- [7] G. Taguchi, A. Elsayed and T. Hsiang, *Quality engineering in production systems*, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 1989.
- [8] K. Ishikawa, *La gestion de la qualité : outils et applications pratiques*, Dunod, Paris, 2007.
- [9] A. Lesage and P. Dehombreux, Maintenance and Quality Control: A First Methodological Approach for Maintenance Policy Optimization, *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, Romania, 2012.