

Développement d'une politique de maintenance d'un dispositif médical dont la dégradation est influencée par l'utilisation

El mehdi Guendouli & Lahcen Mifdal

Laboratoire d'Innovation Durable et de Recherche

Appliquée (LIDRA)

Ecole Polytechnique d'Agadir - Universiapolis

Agadir, Maroc

Elmehdi@e-polytechnique.ma

mifdal@e-polytechnique.ma

Said Kharraja

Laboratoire d'Analyse des Signaux et Processus Industriels

Université Jean Monnet de Saint Etienne

said.kharraja@univ-st-etienne.fr

Abstract— *Cet article traite un problème de maintenance périodique d'un dispositif médical dans le milieu hospitalier. Le problème consiste en un dispositif médical satisfaisant une demande aléatoire de patients (le nombre de patient qui subissent mensuellement le diagnostic sur le dispositif médical est variable).*

L'objet de l'étude consiste à développer une politique de maintenance qui a pour but de minimiser le coût total de maintenance. Pour développer le modèle d'optimisation, nous avons pris en considération l'influence du taux d'utilisation du système sur sa dégradation.

Une étude analytique et un exemple numérique sont présentés afin de prouver l'approche développée.

Keywords— **Politique de maintenance ; dispositif médical ; nombre de patients aléatoire ; taux de défaillance**

I. INTRODUCTION

L'actuel environnement des hôpitaux se caractérise par une concurrence forte. Les exigences et attentes des clients deviennent de plus en plus fortes en termes de qualité des services, coût, délais et réactivité. Dans ce contexte, avoir un système hospitalier performant, reste toujours la préoccupation majeure de tous les gestionnaires dans le monde hospitalier. Dans la quête de surmonter ces obstacles, la littérature scientifique a identifié la collaboration entre les domaines de la santé et de l'ingénierie des systèmes comme possédant un grand potentiel. Les études récentes ont suggéré des solutions intéressantes aux problèmes d'efficacité des soins de santé de l'ingénierie, de la recherche opérationnelle et des perspectives de la gestion d'entreprise [1], [2], [3], [4], [5].

La recherche de la qualité totale et surtout la réduction des coûts, la maintenance dont la mission était de garantir le bon fonctionnement des outils de production, est dorénavant devenue une des principales fonctions stratégiques de toute entreprise.

La sécurité des dispositifs médicaux et les risques associés à leur utilisation est l'une des questions essentielles pour les organisations de soins de santé à travers le monde [6]. Un dispositif médical peut être une machine ou un instrument qui est utilisé pour le diagnostic, traitement ou surveillance des maladies. Sa dégradation crée un risque inacceptable de non satisfaction des patients. En outre, ils existent aussi des risques de blessures du personnel de nature simples et directes, tels que des défaillances mécaniques ou le contact accidentel avec des parties électrisées d'un appareil [7], par exemple, des défauts dans les machines à ultrasons, des valves cardiaques artificielles défectueuses, fuite dans les pompes d'insuline [8], et un nombre élevé de pannes et d'erreurs qui engendrent l'arrêt complet du dispositif médical ou juste une partie de ce dernier, comme le cas du plateau glissant du scanner. Ainsi, la maintenance des dispositifs médicaux est fondamentale et appelle à un cadre efficient et efficace pour hiérarchiser les dispositifs médicaux pour les activités de maintenance basées sur les critères clés pour le choix de la meilleure politique de maintenance pour chaque appareil [9].

Le travail de [10] a pour objectif de s'inspirer des outils et des méthodes d'analyse des risques du milieu industriel (analyse fonctionnelle, analyse préliminaire des risques, Analyse des modes de défaillance et de leurs effets, analyse qualitative de défaillance et analyse quantitative des défaillances), afin de les appliquer dans le milieu hospitalier et de les utiliser pour des dispositifs médicaux (Moniteurs, pompes à perfusions, scanner ...). Le but de son étude est d'établir des règles de maintenance adéquates qui ont pour but de maîtriser les risques liés à la maintenance.

Pour réglementer le milieu hospitalier, un bon nombre de textes législatifs relatifs aux dispositifs médicaux ont été élaborés. Ces textes mettent l'accent sur la maintenance préventive [11], [12]. La minimisation des coûts globaux est possible par l'instauration d'une politique de maintenance préventive [13].

L'objet de cet article consiste donc à contribuer au développement des politiques de maintenance dans le domaine hospitalier. La politique proposée a pour but de déterminer les périodes idéales pour effectuer les actions de maintenance préventive, tout en prenant en considération l'influence du taux d'utilisation sur la dégradation de l'équipement. Dans ce cadre, [14] a pris en considération l'influence des cadences de production sur la dégradation de la machine faisant appel à un sous-traitant pour rattraper le reste de la demande non satisfaite par la machine principale. [15] a également pris en considération cette influence pour une machine qui produit plusieurs produits.

La méthodologie préconisée pour présenter ce travail s'échelonne sur six parties. La section II est dédiée à présenter la problématique. Dans la section III nous avons expliqué les différentes notations utilisées dans les formules, figures et tableau. La section IV est consacrée au développement du modèle. Un exemple numérique est étudié dans la section V, afin d'appliquer l'approche développée. Finalement, la conclusion est présentée dans la section VI.

II. PROBLÉMATIQUE

Le système considéré dans ce papier consiste en un dispositif médical dans un centre hospitalier. Ce dispositif est prescrit par les médecins pour poser ou compléter un diagnostic.

Cette étude traite le cas d'un dispositif médical recevant mensuellement un nombre de patient aléatoire, caractérisé par une distribution normale. Les paramètres : moyens et écart-type de loi normale sont respectivement \mathbf{N}_p et σ_N .

Du point de vue fiabilité, nous présumons que la loi de dégradation du dispositif médical est de type Weibull dont le taux de panne $\lambda_i(\mathbf{t})$ est croissant avec le temps et selon l'usage (la dégradation du dispositif est influencée par le taux de son utilisation). Le dispositif médical est soumis à une politique de maintenance dans le but de déterminer le nombre optimal d'actions de maintenance préventive, qui minimise le coût total de maintenance.

En prenant en compte le taux de défaillance, nous avons calculé le nombre moyen de pannes, et par la suite le calcul du coût total de maintenance. Prendre en considération la variation du nombre de patients qui subissent un diagnostic sur le dispositif médical justifie l'évolution du taux de défaillance.

III. NOTATIONS

N_p : Moyenne du nombre de patient reçu mensuellement
 σ_N : Ecart type du nombre de patient reçu mensuellement
 δt : Longueur d'une période
 H : Nombre de répartition de l'horizon fini
 $\lambda_i(\mathbf{t})$: Taux de défaillance du dispositif à la période i
 $\lambda_n(\mathbf{t})$: Taux de défaillance nominal du dispositif
 $p(i)$: Nombre de patient diagnostiqué à la période i
 P_m : Nombre maximum de patients

C_p : Coût d'une action de maintenance préventive
 C_c : Coût d'une action de maintenance corrective
 $I_p(N)$: Coût total des actions de maintenance associé à la politique périodique
 $\psi_p(N)$: Nombre moyen de pannes associé à la politique périodique
 N : Nombre d'actions de maintenance préventive à effectuer sur l'horizon $H \times \delta$ (notre variable de décision)
 T : Période d'intervention

IV. DÉVELOPPEMENT DU MODELE

A. Cadre général

La politique de maintenance périodique adoptée, est caractérisée par l'intervention pour des remplacements ou des actions de maintenance périodique à des intervalles de temps constants. Cette répartition est représentée dans la figure 1.

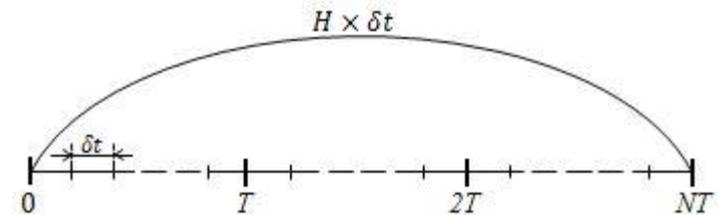


Fig. 1. L'horizon fini réparti en N intervalles périodique (N=1,2,...)

Pour développer cette politique de maintenance, nous avons pris en considération les hypothèses suivantes :

- Les coûts des actions de maintenance préventive et corrective sont connus et constants ;
- La dégradation du système est considérée linéaire ;
- Le temps de remplacement et de réparation sont négligeable.

Rappelons que le but de cette politique est de déterminer le nombre optimal d'actions de maintenance préventive \mathbf{N} sur l'horizon $\mathbf{H} \times \delta$ et par conséquent, déterminer la période optimale d'intervention \mathbf{T} qui minimise le coût total de maintenance.

B. Taux de défaillance

Après un remplacement ou une action de maintenance préventive, on considère l'état du système comme étant neuf (As Good As New). En cas de panne entre les remplacements ou les actions de maintenance préventive, une réparation minimale est appliquée au système.

Les actions de maintenance sont appliquées à la fin des périodes M . L'horizon est réparti en N périodes de maintenance de durées égales T , ($M = 1, \dots, N$).

La figure ci-dessous représente l'évolution du taux de défaillance dans chaque période.

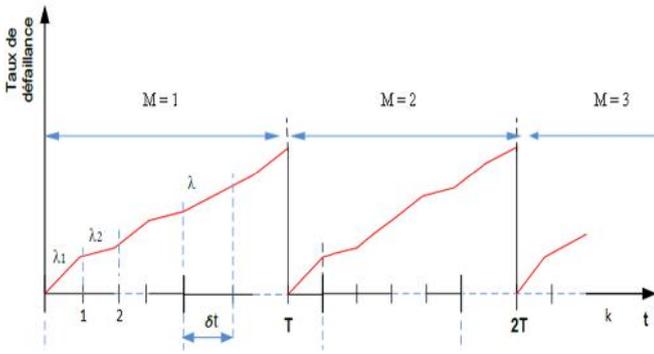


Fig. 2. Evolution du taux de défaillance

D'après la figure 2, le taux de défaillance du dispositif $\lambda_i(t)$ évolue dans le temps et est remis à zéro après chaque remplacement ou action de maintenance préventive effectuée à des instants périodiques $M \times T$, ($M = 1, \dots, N$).

Formellement, l'expression du taux de pannes (défaillance) $\lambda_i(t)$, que nous considérons croissant, est défini par :

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i-1}(t) \times \left(1 - \ln \left[\frac{i-1}{\left(\ln \left[\frac{i-2}{T} \right] + 1 \right) \times T} \right] \right) + \frac{p(i)}{P_m} \times \lambda_n(t) \quad t \in [0, \delta t] \quad (1)$$

Avec $I_1[x]$: partie entière du nombre x

Sachant que la période d'intervention T est définie comme suit :

$$T = A \left[\frac{H}{N} \right] \times \delta t \quad (2)$$

A $[x]$: Arrondi à l'entier le plus proche du nombre x

Cette fonction du taux de défaillance se compose principalement de trois parties essentielles : $\lambda_{i-1}(t)$ qui décrit le taux de défaillance correspondant à l'ancienne période.

Le terme $\left(1 - \ln \left[\frac{i-1}{\left(\ln \left[\frac{i-2}{T} \right] + 1 \right) \times T} \right] \right)$ a pour but de remettre à zéro le taux de défaillance après chaque intervalle $M \times T$, ($M = 1, \dots, N$).

Quant à l'expression $\frac{p(i)}{P_m} \times \lambda_n(t)$, permet d'accumuler le taux de défaillance en se basant sur la cadence de passage des patients sur le dispositif médical.

C. Nombre moyen de pannes

Le nombre moyen de pannes associé à la politique périodique pendant l'horizon $H \times \delta$ pour chaque intervalle $[j \cdot \delta, (j+1) \cdot \delta]$

$$\psi_p(N) = \sum_{M=1}^N \left(\sum_{i=(M-1) \times T+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt + \sum_{i=(M \times T)+1}^H \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt - \sum_{i=H+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt \right) \quad (3)$$

L'expression $\sum_{i=(M-1) \times T+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt$ est prise en compte lorsque $M \times T < H \times \delta$, sinon, elle est égale à zéro.

L'expression $\sum_{i=H+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt$ est prise en compte lorsque $M \times T > H \times \delta$, sinon, elle est égale à zéro.

Dans cette politique périodique, nous avons pu établir un modèle analytique qui permet l'obtention du nombre optimal de répartition, par conséquent, la période optimale où les actions de maintenance préventive (remplacements) doivent être appliquées pour minimiser le coût total de maintenance et cela dans le cas où le taux de défaillance du système est linéaire.

D. Coût total de la maintenance

En considérant la dégradation du système linéaire, C_p représente le coût d'une action de maintenance préventive et C_c représente le coût d'une réparation minimale, le coût total de la maintenance pendant l'horizon $H \times \delta$ s'exprime comme suit :

$$I_p(N) = C_c \times \psi_p(N) + C_p \times N \quad (4)$$

En substituant (3) dans (4), l'expression du coût total de maintenance est représentée comme suit :

$$I_p(N) = C_c \times \left(\sum_{M=1}^N \left(\sum_{i=(M-1) \times T+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt + \sum_{i=(M \times T)+1}^H \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt - \sum_{i=H+1}^{M \times T} \int_0^{\delta t} \lambda_i(t) dt \right) \right) + C_p \times N \quad (5)$$

L'existence d'un nombre optimal de partition N , et par conséquent, la période optimale de maintenance préventive T est prouvée dans la littérature. [16] a prouvé que la période optimale de maintenance préventive T existe si le taux de défaillance est croissant.

V. EXEMPLE NUMÉRIQUE ILLUSTRATIF

Dans cet exemple, nous allons tester notre modèle sur des données qui ne sont pas réelles. Nous allons prendre le cas d'un centre hospitalier où le service est doté d'un dispositif médical qui peut recevoir un nombre maximal de patients mensuel $P_m = 25$.

A. Données relatives à la fiabilité du dispositif

Les données relatives à la fiabilité du dispositif sont représentées comme suit :

- La loi de défaillance caractérisant les conditions nominales, est de type *Weibull*, $W(2, 12)$, avec $\beta = 2$ est le paramètre de forme, et $\mu = 12 m$ est le paramètre d'échelle
- Le taux de panne initial : $\lambda_0 = 0$
- $C_c = 1500 u$, (coût d'une action de maintenance corrective, exprimée en unité monétaire)
- $C_p = 300 u$, (coût d'une action de maintenance corrective, exprimée en unité monétaire)
- $\delta = 1 m$, (longueur d'une période)
- $H = 60$ périodes

B. Données relatives aux nombre de patients

Les données relatives au nombre de patients reçu mensuellement sont les suivantes :

- La moyenne du nombre de patients reçus mensuellement est $N_p = 20$ personnes
- L'écart type du nombre de patients reçus mensuellement est $N = 4$

En se basant sur la moyenne et l'écart type du nombre de patients reçus mensuellement, les nombres de patients sur l'horizon de 60 mois sont représentés ainsi :

{ $P_1 = 23 ; P_2 = 20 ; P_3 = 17 ; P_4 = 21 ; P_5 = 12 ; P_6 = 24 ; P_7 = 25 ; P_8 = 19 ; P_9 = 10 ; P_{10} = 16 ; P_{11} = 22 ; P_{12} = 13 ; P_{13} = 15 ; P_{14} = 24 ; P_{15} = 11 ; P_{16} = 20 ; P_{17} = 21 ; P_{18} = 18 ; P_{19} = 14 ; P_{20} = 12 ; P_{21} = 23 ; P_{22} = 20 ; P_{23} = 16 ; P_{24} = 24 ; P_{25} = 10 ; P_{26} = 19 ; P_{27} = 20 ; P_{28} = 16 ; P_{29} = 12 ; P_{30} = 14 ; P_{31} = 21 ; P_{32} = 24 ; P_{33} = 13 ; P_{34} = 19 ; P_{35} = 16 ; P_{36} = 20 ; P_{37} = 10 ; P_{38} = 17 ; P_{39} = 19 ; P_{40} = 13 ; P_{41} = 25 ; P_{42} = 20 ; P_{43} = 18 ; P_{44} = 11 ; P_{45} = 18 ; P_{46} = 23 ; P_{47} = 20 ; P_{48} = 15 ; P_{49} = 21 ; P_{50} = 10 ; P_{51} = 20 ; P_{52} = 24 ; P_{53} = 19 ; P_{54} = 13 ; P_{55} = 10 ; P_{56} = 15 ; P_{57} = 14 ; P_{58} = 16 ; P_{59} = 17 ; P_{60} = 20 ;$ }

En appliquant la procédure numérique, nous avons obtenu le nombre optimal d'actions de maintenance préventive N et la période optimale d'intervention T qui minimise le coût total de maintenance.

Tableau 1: Le coût de maintenance en fonction du nombre de périodes d'intervention

N	$\Gamma_p(N)$	N	$\Gamma_p(N)$
1	13924,2	11	5674,17
2	7586,67	12	5003,33
3	5690,83	13	5303,33
4	4836,67	14	6140
5	4329,17	15	5584,17
6	4332,5	16	5884,17
$N^*=7$	4211,67	17	6184,17
8	4299,17	18	7527,08
9	4375	19	7345,42
10	4509,17	20	6880,42

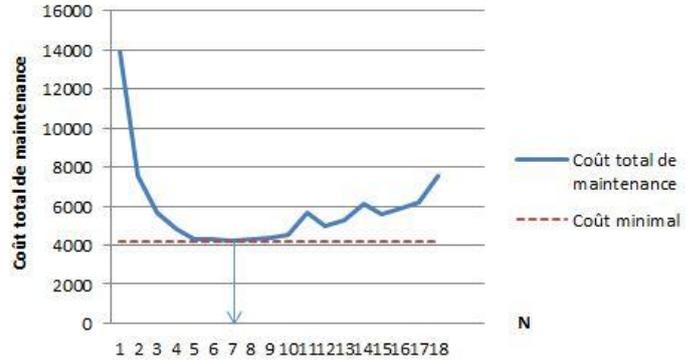


Fig. 3. Le coût de maintenance en fonction du nombre de périodes d'intervention

La figure 3 illustre le coût total de maintenance de la politique périodique en fonction du nombre de répartition N . Le nombre optimal d'actions de maintenance préventive est $N^* = 7$ actions. Par conséquent, la période optimale de maintenance $T = A \left[\frac{H}{N} \right] \times \delta = 9 m$.

Cette stratégie engendrent de ce fait, un coût total de maintenance de $\Gamma_p(N) = 4,211,67 u$.

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Dans cette étude, nous avons développé une stratégie de maintenance dite périodique et qui consiste à définir le nombre optimal d'actions de maintenance préventive durant l'horizon du temps fini, par conséquent, la durée optimale des intervalles de maintenance préventive. Nous avons tenu en compte l'influence de la cadence de passage des patients sur la dégradation du dispositif médical, afin d'établir notre modèle d'optimisation, qui a pour but de définir le plan optimal de maintenance.

Le plan optimal de maintenance établi, nous a permis de trouver le coût total de maintenance optimal ainsi que le nombre optimal d'actions de maintenance préventive pour un dispositif médical.

Les résultats obtenus dans ce travail peuvent également aboutir à des perspectives intéressantes. A court termes, nous envisageons tenir compte des périodes de maintenance. Nous

rappelons que tout au long de notre travail, nous avons négligé les durées de maintenance préventive et corrective. La considération de ces durées affecte la politique de maintenance établie. A moyen terme, il est intéressant de considérer d'une façon concrète l'impact de la logistique en maintenance sur l'étude réalisée. Il est clair que la logistique en maintenance est absente dans la majorité des travaux de recherche. A long terme, nous rappelons que le modèle a été testé sur des données qui ne sont pas réelles. Nous envisageons donc l'expérimenter sur des données collectées auprès des partenaires hospitaliers.

multiple-product manufacturing system. *International journal of Mathematical Problems in Engineering*. Article ID 769723, 17 pages.

- [16] Nakagawa, T., & Mizutani, S. (2009). A summary of maintenance policies for a finite interval. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1), 89-96.

RÉFÉRENCES

- [1] Boyer, K. K., & Pronovost, P. (2010). What medicine can teach operations: What operations can teach medicine. *Journal of Operations Management*, 28, 367–371.
- [2] Friedman, B. A., & Mitchell, W. (1991). Using the laboratory information system to achieve strategic advantage over the competitors of hospitals based clinical laboratories. *Clinics in Laboratory Medicine*, 11(1), 187–202.
- [3] Grossmann, C., Goolsby, W. A., Olsen, L., & McGinnis, J. M. (2008). Engineering a learning healthcare system: A look at the future workshop summary. 29–30 April 2008, Washington, DC.
- [4] Mahara, S., Bretthauer, K. M., & Salzarulo, P. A. (2011). Locating specialized service capacity in a multi-hospital network. *European Journal of Operational Research*, 212(3), 596–605.
- [5] Richman, B. D., Udayakumar, K., Mitchell, W., & Schulman, K. A. (2008). Lessons from India in organizational innovation: A tale of two heart hospitals. *Health Affairs*, 27(5), 1260–1270.
- [6] Florence, G., & Calil, S. J. (2007). Risk classification of medical equipment in alert states. *Journal of Clinical Engineering*, 32(2), 79-84.
- [7] Ridgway, M. (2009). Optimizing our PM programs. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 43(3), 244-254.
- [8] Fries, R. C. (2012). *Reliable design of medical devices*. CRC Press.
- [9] Jamshidi, A., Rahimi, S. A., Ait-kadi, D., & Ruiz, A. (2015). A comprehensive fuzzy risk-based maintenance framework for prioritization of medical devices. *Applied Soft Computing*, 32, 322-334.
- [10] Soncini, E., & Petit, A. (2002). Gestion des risques et choix de maintenance à l'hôpital. *ITBM-RBM*, 23(3), 172-179.
- [11] Farges G. Accreditation EN 45001 au service biomédical. *RBMNews* 1999 ; 21, 10 :10-12.
- [12] Gambelli F L'obligation de maintenance des équipements dans la nouvelle réglementation technique communautaire. *Techniques hospitalières* 1998 ; no 585- 623 : 62.
- [13] Coulibaly, S., Kouam, P., & Page, M. (2001). Organisation de la maintenance préventive en milieu hospitalier. *ITBM-RBM*, 22(2), 125-133.
- [14] Hajej Z., Dellagi S., Rezg N. (2011). Optimal integrated maintenance/production policy for randomly failing systems with variable failure rate. *International Journal of Production Research*, vol. 49, Issue 19, p5695- 5712.
- [15] Mifdal L., Hajej Z., Dellagi S. (2015). Joint optimization approach of maintenance and production planning for a