

Nouvelle approche pour l'intégration des activités de maintenance et des opérations de production

Ghita ETTAYE, Abdellah EL BARKANY et Ahmed EL KHALFI
Laboratoire Génie Mécanique, Faculté des Sciences et Techniques, USMBA Fès
BP 2202 Route d'Immouzzar, FES, MAROC
ettaye@gmail.com
a_elbarkany2002@yahoo.fr
aelkhalfi@gmail.com

Résumé — Généralement, la planification des tâches de maintenance et l'ordonnement des opérations de production sont traités séparément dans l'industrie sous la stratégie séparée. Etant donné que la maintenance touche la capacité de production et le temps de cette dernière influe sur la probabilité de défaillance des composants dans un système de production, cette interdépendance semble être négligée dans la littérature de la planification séquentielle. Pour résoudre cette problématique, ce papier présente un modèle définissant une fonction objective qui intègre les coûts des activités de maintenance et ceux des opérations de production pour un système multi-état (multi-lignes, multi-périodes et multi-produits) cette intégration conduit à une réduction du coût globale maintenance/production.

Mots clés— maintenance préventive ; plan de production ; multi-ligne ; modélisation ; multi-état ; planification intégrée.

I. INTRODUCTION

Dans notre papier on va étudier le problème de la planification intégrée de la maintenance et la production dans le cadre d'un système soumis à des remplacements préventifs périodiquement avec des réparations minimales en cas de défaillances imprévues. Nous allons développer un modèle prenant en considération l'interdépendance entre le plan de la maintenance et celui de la production tout cela en agissant sur le coût globale qui va contenir deux tranches : la première rassemble les coûts du lancement d'un produit, du production, du stockage et de la rupture sur la demande, ainsi que la deuxième comprend les coûts des maintenances préventives et des réparations minimales pour un système de production multi-périodes, multi-références et multi-lignes.

Souvent dans l'industrie les clients n'admettent pas les retards sur les commandes. En fait, il existe des clients qui ne tolèrent aucun retard sur la livraison des produits. Dans cette circonstance, la commande est rejetée et on parle d'une perte partielle ou totale de la demande, c'est la définition de la rupture sur la demande. Dans la pratique, on constate deux axes qui provoquent la rupture, la première cause est la limitation des capacités disponibles car elles ne sont pas suffisantes pour satisfaire les demandes aux dates prévues. La seconde cause est économique. En fait, il est rentable d'avoir

des ruptures sur les demandes plutôt que de les satisfaire en entier, surtout quand la somme du coût de production et de stockage est supérieure au coût de rupture. La conséquence la plus menaçante est la perte du client ainsi que la mauvaise réputation qui peut avoir comme risque majeur la perte de futurs clients et par conséquent la diminution des ventes. L'un de nos objectifs est la minimisation des ruptures sur la demande parce qu'elles sont des pénalités très élevées dans la fonction objective en comparaison avec les autres coûts. Les ruptures sont modélisées par des variables continues avec des pénalités unitaires dans la fonction objective et une contrainte de borne.

II. REVUE DE LITTÉRATURE

De nombreuses recherches liées à la planification intégrée de la production et la maintenance peuvent être trouvées dans la littérature [3] au cours de ces dernières années. Dans les travaux [1] et [2], les auteurs ont montrés les avantages de cette intégration. En effet, la communication et la collaboration entre les actions de maintenance et les opérations de production sont les principaux clés pour réussir l'organisation et la planification d'un système de production.

Dans le cas d'un système qui possède un ensemble de lignes de production en parallèles les auteurs de [3] ont traité pour la première fois le problème de planification intégrée, ils ont suggéré un algorithme basé sur la décomposition lagrangienne afin de résoudre un modèle non linéaire mixte de planification de la maintenance périodique et non périodique et de la production, comme extension des travaux dans [2], qui ont proposé leur modèle pour une seule ligne. En effet, une réparation minimale est effectuée en cas de panne d'une ligne et des remplacements préventifs sont faites périodiquement pour renouveler les lignes de production afin d'optimiser le coût global. Ensuite, il vient le travail cité dans [4], qui ont à leur rôle exploité le travail de [5] et celui de [3] pour étudier le cas des systèmes contenant des composants parallèles avec une dépendance économique et stochastique (défaillance des causes communes DCC), ils ont utilisé le modèle β -facteur pour représenté les DCC en supposant deux causes possibles pour la panne du système : la défaillance indépendante des composants simples et la DCC simultanée de tous les

Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI 2015, 2-4 Décembre 2015, Tanger - Maroc.

Xth International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2015, December 2-4, 2015, Tangier - Morocco.

composants. Une politique de maintenance du groupe T-âge a été appliquée et dans ce cas les composants sont cycliquement renouvelés tous ensemble avec des réparations minimales en cas de pannes imprévus en ajoutant la planification d'un lot-sizing dans le but de minimiser la somme des coûts pour une demande des produits dans un horizon fini. Finalement il vient le plan intégré dans [6] qui n'a pas seulement considéré le cas des systèmes multi-lignes, multi-périodes et multi-produits mais aussi il a pris en considération la dégradation des lignes de production, Cette dégradation est représenté dans le modèle comme une réduction des capacités des lignes de production en fonction de l'évolution du temps, les opérations de maintenance sont supposés fournir les lignes dans un état de fonctionnement as good as new avec capacité maximale, Grâce à l'étude des limites des modèles, il est démontré que cette dernière approche peut faire face à une gamme de problèmes plus large que celle des travaux faites dans [3].

III. MODELE MATHEMATIQUE

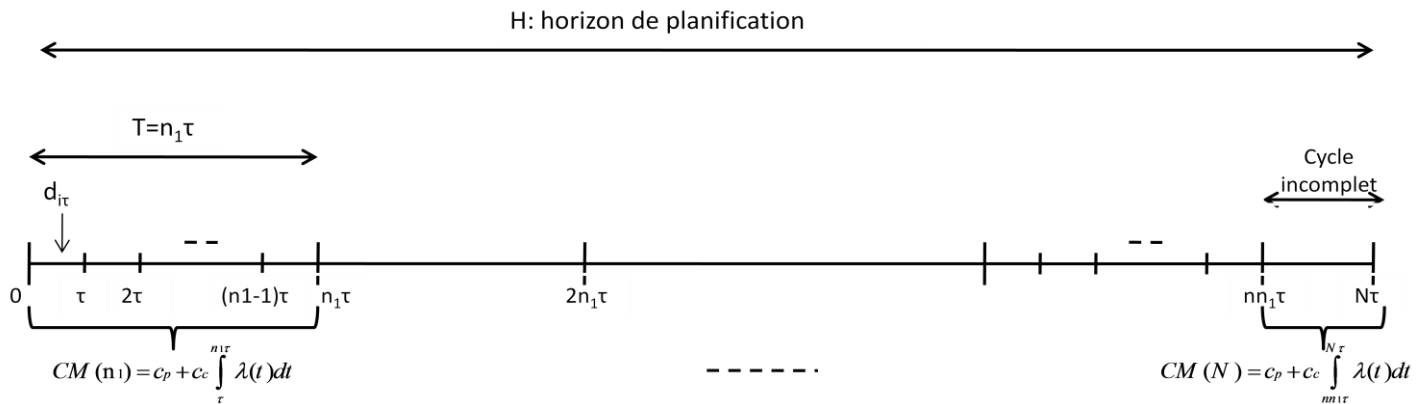
A. La politique de maintenance

D'après la norme européenne (NF EN 13306 X 60-319) la maintenance est défini par « L'ensemble de toutes les actions

techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » cette norme a devisé la maintenance en deux principaux types en se basant sur le critère de la panne : D'abord la maintenance corrective qui est effectuée après la défaillance d'un système ou d'une partie du système dans le but de le remettre à un état qui lui permet d'accomplir la fonction qui lui est affecté, ensuite la maintenance préventive qui est effectuée périodiquement dans le but d'assurer le bon fonctionnement et d'éviter les pannes. Dans notre modèle la politique de maintenance propose de remplacer préventivement et périodiquement le système de production à des instants prédéterminés $T = k\tau, 2k\tau, 3k\tau...$ et faire une réparation minimale en cas de défaillance non planifiée à l'intérieur du cycle T.

H un horizon de planification couvre N périodes de longueur de base fixe τ est exprimé par $H = N\tau$ et R un ensemble de produits qui doit être produit pendant H, pour chaque produit $i \in R$ une demande d_{it} doit être satisfaite dans chaque période $t \in H$ (voir la Fig. 1).

Fig.1. planification de la maintenance sur un horizon finie.



On suppose que pour une période $t \in H$ donnée, $f(t)$ la fonction de densité de probabilité et $F(t)$ la fonction de distribution cumulative sont connues et définie pour une loi de probabilité pour un système de production. $\lambda(t)$ est le taux de défaillance pour un système à la période t tel que :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}; \forall t \in H \quad (1)$$

Pour les conditions de la loi de Gamma et de Wei bull le taux de défaillance est définie par :

$$\int_0^m \lambda(t) dt = \int_0^m \frac{f(t)}{1 - F(t)} dt = \log \left(\frac{1 - F(0)}{1 - F(m)} \right) = -\log(1 - F(m))$$

avec $F(0) = 0$ (2)

En se basant sur (2) et Fig. 1 on peut calculer le coût de maintenance CM(t) qui inclue le coût correctif c_c pour chaque composant en panne et préventif c_p , pour les composant non défaillant ; sachant que $[E]$ est le plus grand entier inférieur ou égale à E, $N1(t)$ est le nombre de défaillances et $N2(t)$ est le nombre de remplacements préventives pendant l'intervalle $[0, t]$:

$$CM(t) = c_c [N_1(t)] + c_p [N_2(t)] \quad (3)$$

Le coût total de la maintenance d'un système de production est une fonction non linéaire des deux types de maintenance, il est exprimé avec l'équation suivante :

$$CM(t) = \frac{H}{T} \left(c_p + c_c \int_0^T \lambda(t) dt \right) \quad (4)$$

En générale l'horizon de planification H n'est pas toujours un multiple de cycle de maintenance préventive. Si on connaît le cycle de maintenance T et la loi de distribution des défaillances on exprime sa valeur en fonction du nombre d'intervalle par cycle T [6] avec :

$$CM(n_1) = [N/n_1] c_p - c_c \log \left[(1-F(n_1\tau))^{[N/n_1]} (1-F((N-[N/n_1]n_1)\tau)) \right] \quad (5)$$

B. Description du système de production

T Nous allons travailler sur la modélisation du problème de lot-sizing classique à capacité finie (noté MCLS : Multi-item Capacitated Lot-sizing problem with Setup times and Shortage costs) en introduisant les coûts de rupture sur la demande, ce travail consiste à déterminer un plan de production d'un ensemble de R références, pour un horizon de planification constitué de N périodes longues (big buckets). Les capacités de production sont limitées et doivent être respectées. Ce plan doit aussi respecter un ensemble de contraintes additionnelles tel que :

- Le lancement de la production d'une référence à une période donnée induit un coût fixe ainsi qu'un coût variable unitaire.
- La demande est exprimée à partir des commandes fermes (à court terme) et complétées par les commandes prévisionnelles (à plus long terme), à la période t et pour chaque référence i .
- Une particularité importante des problèmes de planification de production est la variation de la demande dans le temps. Ces variations poussent le décideur à anticiper ses demandes et à les fabriquer quelques périodes plus tôt. Afin d'amortir les coûts fixes, le décideur est également contraint de lancer des campagnes de production. Ces deux décisions ainsi que les capacités limitant entraînent des stratégies de stockage. Ceci induit un coût de stockage unitaire pour chaque référence et à chaque période. Les références peuvent avoir une durée de vie limitée, celle-ci est exprimée en nombre de périodes. Cette contrainte limitera les anticipations de la production et par conséquent la production maximale.
- Une problématique souvent rencontrée dans l'industrie, c'est que la production soit un multiple d'une taille de lot fixée. Dans les modèles classiques de lot-sizing, la variable qui représente les quantités produites est souvent continue, et ne prend pas en compte le fait que la production ne puisse être réalisée qu'en multiple d'une quantité donnée.

H un horizon de planification couvre N périodes de longueur de base fixe τ est exprimé par $H = N\tau$ et R un

ensemble de produits qui doit être produit pendant H , pour chaque produit $i \in R$ une demande d_{it} doit être satisfaite dans chaque période $t \in H$.

Supposons que le système de production a une capacité nominale c_{\max} et chaque action de maintenance préventive ou corrective consomme un pourcentage de cette capacité ($P_p = ac_{\max}$ et $P_c = bc_{\max}$ unités de capacité tel que $0 \leq a \leq b \leq 1$ cette dernière hypothèse peut être justifiée par le fait que les ressources de capacité en cas de défaillance aléatoire se consomment plus puisque certaines activités de réparation hors ligne doivent dans ce cas être réaliser en ligne), alors la capacité disponible dans chaque période t est donnée en unité de temps par $C(t)$ tel que:

- Si la maintenance préventive est faite dans la période

$$C(t) = c_{\max} - P_p - P_c \int_0^{\tau} \lambda(u + (t-1)\tau) du \quad (6)$$

- Si non pour les autres intervalles :

$$C(t) = c_{\max} - P_c \int_0^{\tau} \lambda(u + (t-1)\tau) du \quad (7)$$

Si on connaît la valeur du cycle $T = n_1\tau$ on peut calculer la capacité $C(t)$, on suppose que les valeurs de capacité soient distribuées identiquement sur tous les cycles de maintenance $T, 2T, 3T \dots$ alors on arrive à calculer la capacité du premier cycle et on en déduit les autres valeurs $\forall t \in H$.

A partir des calculs faites dans [6] et l'équation (2) :

Si

$$t = (n_1k + u)\tau / k \in \{1, \dots, [N/n_1]\} / u \in \{1, \dots, n_1\} : C(t) = C(u\tau)$$

alors $C(t)$ est égale à :

$$\left\{ \begin{array}{l} C(\tau) = c_{\max} - P_p + P_c \log(1 - F(\tau)) \\ C(n_1\tau) = c_{\max} - P_c \log\left(\frac{1 - F((n_1-1)\tau)}{1 - F(n_1\tau)}\right) \\ C(t = n_1k\tau + u) = C(u); \\ \text{tel que } k \in \{1, \dots, [N/n_1]\}; u \leq (n_1-1)\tau; u \leq N - kn_1\tau \end{array} \right. \quad (8)$$

C. Modèle intégré

En se basant sur les hypothèses suivantes la modélisation du problème de planification intégrée de la maintenance et la production PIMP devient plus simple:

- Tous les calculs se font à la fin de chaque période (Incrémentation des stocks, livraisons, pertes...);
- Les coûts ainsi que les besoins fixes sont comptabilisés à chaque période de production, même si la production est lancées à des périodes consécutives.

Afin de décrire le modèle mathématique du problème PIMP, on utilise les notations suivantes :

Les paramètres :

d_{it} : Demande (commandes et prévisions) pour la référence i à la période t .

f_{it} : Besoin fixe en ressources de la référence i à la période t .

v_{it} : Besoin variable en ressources de la référence i à la période t .

$C(t)$: Capacité (totale) de production disponible dans chaque période t .

α_{it} : Coût variable de production d'une unité pour la référence i à la période t .

β_{it} : Coût fixe relatif à un lancement de la référence i à la période t .

γ_{it} : Coût variable de stockage d'une unité pour la référence i à la période t .

φ_{it} : Coût variable de rupture sur la demande d'une unité pour la référence i à la période t .

M : Le majorant de la production.

λ_{it} : Période maximale pour laquelle on peut anticiper la production de la référence i à la période t .

ρ_i : Le temps de traitement pour chaque unité de la référence i .

c_c : Coût pour effectuer une action de réparation minimale (maintenance corrective).

c_p : Coût de chaque remplacement préventive (maintenance préventive) $C_p \leq C_c$.

τ : La durée de base pour chaque période de planification (1 mois).

Les variables :

x_{it} : Quantité produite pour la référence i à la période t .

$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si il y a production de la référence } i \text{ à la période } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

$x_{it} > 0$ et 0 sinon

s_{it} : Niveau du stock en fin de période t pour la référence i .

r_{it} : Rupture sur la demande pour la référence i à la période t (inférieure à la demande).

T : Cycle de maintenance préventive avec $T = k\tau$.

En utilisant ces variables et paramètres, nous formulons le problème PIMP comme suit :

$$\min \left(\sum_{i=1}^R \sum_{t=1}^H (\alpha_{it} x_{it} + \beta_{it} y_{it} + \gamma_{it} s_{it} + \varphi_{it} r_{it}) + CM(t) \right) \quad (9)$$

$$x_{it} + r_{it} - r_{i(t-1)} - s_{it} + s_{i(t-1)} = d_{it}; \forall i \in R, \forall t \in H \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^R (v_{it} x_{it} + f_{it} y_{it}) \leq C(t); \forall t \in H \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^R \rho_i x_{it} \leq C(t); \forall t \in H \quad (12)$$

$$x_{it} \leq M y_{it}; \forall i \in R, \forall t \in H \quad (13)$$

$$r_{it} \leq d_{it}; \forall i \in R, \forall t \in H \quad (14)$$

$$x_{it}, s_{it}, r_{it} \geq 0; \forall i \in R, \forall t \in H \quad (15)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\}; \forall i \in R, \forall t \in H \quad (16)$$

La fonction objective (9) minimise le coût total induit par le plan de production (les coûts variables de production et de stockage, ainsi que les coûts fixes de lancement et de rupture sur la demande) et le plan de maintenance (coûts des tâches préventives et corrective). La contrainte (10) exprime la conservation des flux à travers l'horizon de planification H pour la référence i à la période t , elle garantit que le stock disponible de la référence i augmente suffisamment avec la quantité produite pour satisfaire la demande dans la période t et le reste est stocké pour les périodes suivantes (rupture). La contrainte (11) exprime le fait que le plan que nous souhaitons calculer doit être à capacité finie. En effet, pour la réalisation d'un plan, nous disposons d'une quantité de ressources qui sera consommée par la production d'une ou plusieurs références. La consommation totale doit rester inférieure à la capacité disponible $C(t)$ qui est exprimé dans chaque période par (8).

La contrainte (12) est une limite de capacité définie pour chaque période, elle garantie que la quantité produite dans une ligne n'excède pas la capacité disponible de cette ligne. La contrainte (13) signifie que s'il y a un lancement de production, alors la quantité produite ne devra pas dépasser le majorant de la production M (17). Celui-ci est défini par le minimum entre la quantité maximale de la référence pouvant être produite et la demande sur le tronçon de l'horizon $[t, \dots, \lambda_{it}]$.

$$M = \min \left(\sum_{t'=t}^{\lambda_{it}=N\tau} d_{it'}, ((C(t) - f_{it}) / v_{it}) \right) \quad (17)$$

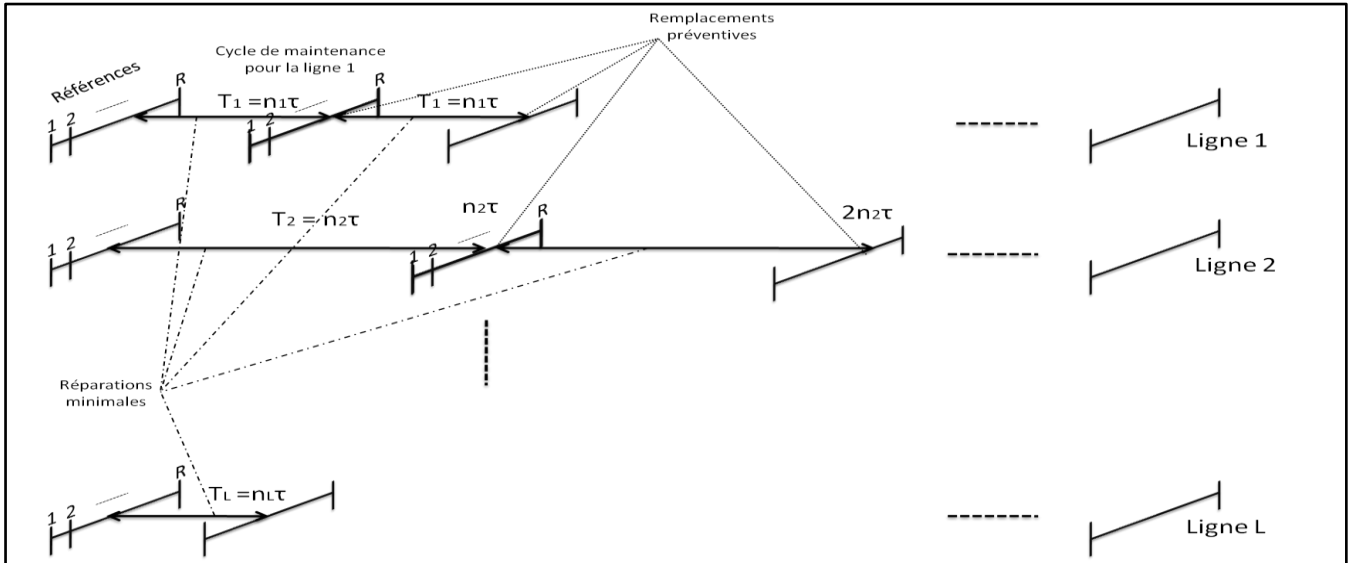
La contrainte (14) assure que la rupture pour la référence i à la période t soit inférieure à la demande de la même référence à la même période. La contrainte (15) garantie que les variables x_{it} , s_{it} et r_{it} sont continues positive pour toute référence i , pour chaque période t . La contrainte (16) exprime le fait que y_{it} est une variable binaire dépendante de la production pour toute référence i et à chaque période t .

N.B : le modèle présenté va être programmé dans les mois prochains afin d’avoir des résultats qu’on peut comparer avec les travaux existant dans la littérature.

Afin de généraliser le modèle du problème PIMP pour un système de production multi-états plus complexe on propose de faire une optimisation dans le cas d’un système qui contient

un ensemble L de lignes de production, N périodes et R références. La Fig. 2 représente un schéma explicatif des différents éléments et des moments appropriés pour faire les activités de maintenance préventive et corrective.

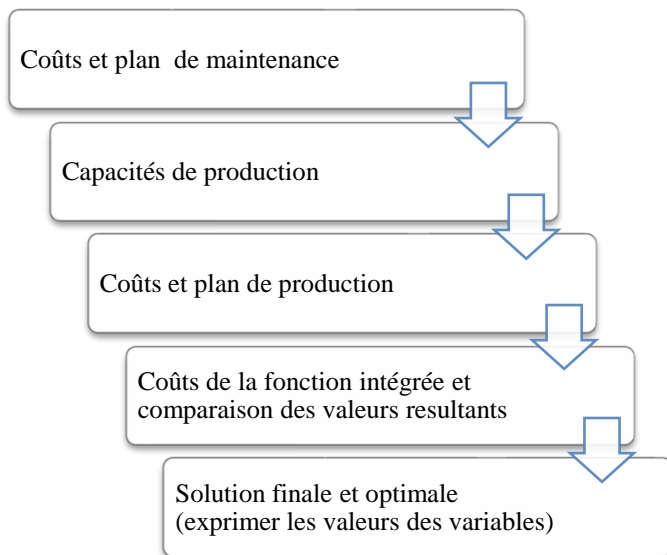
Fig. 2. Système de production multi-périodes, multi-références et multi-lignes.



D. Résolution du modèle

Pour déterminer la solution du problème PIMP nous allons suivre une procédure avec différentes étapes. D’abord pour une valeur de cycle T calculer les différents coûts de maintenance en fonction de la valeur de n_i , ensuite déterminer les différentes capacités afin de calculer le plan de production pour un problème MCLS puis déterminer le coût total optimal enfin présenter la solution finale qui définit les valeurs optimales du plan intégré. Toutes ces opérations sont citées dans la Fig. 3:

Fig. 3. Les étapes de la résolution.



IV. CONCLUSION

Dans cette communication nous présentons une solution importante pour éviter le conflit entre les activités de maintenance et les opérations de production. En effet, la structuration d’un modèle qui ajoute un ensemble de contraintes par rapport aux modèles déjà existants tel que le problème de la rupture sur la demande ainsi que des contraintes limitant la capacité.

Finalement, nous souhaitons tester très prochainement cette approche de modélisation sur des données réelles d’une entreprise afin de montrer l’efficacité de la planification intégrée. Nous envisageons dans des travaux futurs ajouter des contraintes sur les systèmes complexes multi-états.

Références

- [1] E. Aghezzaf, M. Jamali, and D. Ait-Kadi, “An integrated production and preventive maintenance planning model”. *European Journal of Operational Research*, vol. 181 (2), pp. 679-685, 2007.
- [2] E. Aghezzaf, C. Sitompul, and N. Najid, “Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems”. *Information Sciences*, vol. 178 (17), pp. 3382-3392, 2008.
- [3] G. ETTAYE, A. Elbarkany and A. Elkhalfi “The integration of maintenance plans and production scheduling for a degradable multi-state system: A literature review”. *International journal of productivity and quality management*, (article acceptée en phase de production), 2015.
- [4] M. Nourelfath, and E. Chatelet, “Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent

- components". *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 101, pp. 59-66, 2012.
- [5] M. Nourelfath, M.C. Fitouhi, and M. Machani, "An Integrated Model for Production and Preventive Maintenance Planning in Multi-State Systems". *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 59(3), pp. 496-506, 2010
- [6] A. Yalaoui, K. Chaabi, and F. Yalaoui, " Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems". *Information Sciences*, vol. 278, pp. 841-861, 2014.