

Proposition d'un modèle de Programme Directeur de Production stable

Carlos HERRERA¹, André THOMAS¹

¹Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN)

Nancy Université, Faculté des Sciences et Techniques, BP 239, 54506, Vandœuvre Cedex, France

Carlos.Herrera@cran.uhp-nancy.fr, Andre.Thomas@cran.uhp-nancy.fr

Résumé— Le Programme Directeur de Production (PDP) établit un lien entre le niveau tactique et opérationnel, en tenant compte des informations fournies par les prévisions de la demande, les commandes fermes, ainsi que la production prévisionnelle obtenue lors du Plan Industriel et Commercial (PIC). Par conséquent, le PDP joue un rôle important pour maintenir un bon niveau de service clients et un système de production efficace. Sur un horizon glissant de planification, le PDP est régulièrement recalculé avec une fréquence spécifique. Les variations entre les quantités proposées lors de ce processus caractérisent l'instabilité et la nervosité du PDP. Celles-ci ont des effets négatifs, à la fois, au niveau tactique mais aussi au niveau opérationnel. L'objectif de cet article est de proposer un modèle de programmation linéaire entière mixte pour le PDP, de façon à ce que l'instabilité et la nervosité puissent être réduites directement par une expression adaptée de la formulation du modèle. L'originalité de notre travail tient dans la recherche d'une solution "sous-optimale" qui obtienne de meilleurs résultats en termes de stabilité et nervosité sans augmenter considérablement le coût total, grâce à seulement une différenciation des solutions. Nous analysons ses résultats en termes de stabilité et de coût. Les résultats montrent effectivement que la formulation proposée conduit à un PDP plus stable et moins de nervosité, sans une grande différence de coût total.

Mots-clés— Planification de la production, systèmes de production industriels, nervosité, programmation linéaire entière mixte.

I. INTRODUCTION

Le Programme Directeur de Production (PDP) est le lien entre les niveaux tactique et opérationnel de décision d'un système de gestion industrielle. Il prend en compte les prévisions de la demande clients et les propositions issues du Plan Industriel et Commercial (PIC) [1] et [2]. Par ailleurs, le PDP a pour vocation de proposer des programmes de travail réalisables, à savoir, il s'assure que les ressources critiques des processus concernés auront bien les capacités nécessaires à la mise en oeuvre de la charge calculée. Un résultat essentiel du PDP est donc d'obtenir des quantités de produits finis à produire par période qui minimisent le coût global de production et qui maximisent l'utilisation des goulots d'étranglement. Ainsi, le PDP est un outil important pour assurer le service dû aux clients, tout en permettant de gérer efficacement le système de production par un bon management de ses contraintes. La fonction dite "Master Planning" (PIC et PDP), est depuis quelques années de plus en plus mise en avant. Effectivement, après la mise sur le marché des APS (Advanced Planning Systems), progiciels d'optimisation couvrant les différents ni-

veaux de décision et toute l'étendue de la chaîne logistique, on voit apparaître aujourd'hui de nouveaux systèmes, les EIO (Enterprise Inventory Optimiser) dont la vocation est de prendre en compte encore plus finement (et en considérant aussi les variabilités du système) les variables et paramètres influant sur les modes de gestion, et donc, les stocks de la chaîne logistique.

Habituellement, un PDP se calcule sur un horizon glissant, cela signifie que le PDP est constamment calculé avec une fréquence spécifique Δt , sur tout l'horizon opérationnel. Nous appellerons cycles, toutes les périodes auxquelles le PDP est calculé. Si nous considérons par exemple $\Delta t = 1$, cela veut dire que le PDP est calculé à chaque période (les différents cycles coïncident avec chaque période) et la quantité de production mise en oeuvre correspondra à la quantité planifiée à la première période du PDP. Grâce à ce processus, la quantité à produire pour n'importe quelle période, pourra être calculée plusieurs fois ($\leq n$), dans des cycles différents. Dans ce qui suit, le nombre de fois qu'une quantité de production a été calculée, pour n'importe quelle période, correspondra au nombre de périodes superposées.

Les différences obtenues par ce processus, entre les quantités planifiées dans le même cycle et entre différents cycles, caractérisent respectivement l'*instabilité* et la *nervosité* du PDP. Le PDP sera stable et moins nerveux, si ces variations sont peu importantes, dans le cas contraire le PDP sera dit instable et nerveux. Cette caractéristique du PDP a des effets négatifs, à la fois, au niveau tactique mais aussi au niveau opérationnel. Nous pouvons citer, en termes d'effets, par exemple, l'augmentation des en-cours de production et l'augmentation du travail en ordonnancement et/ou réordonnancement.

Comme nous l'avons lu dans les paragraphes ci-dessus, nous faisons la différence entre deux effets au niveau de PDP qui sont l'instabilité et la nervosité du PDP. L'instabilité du PDP se référera aux différences entre les quantités planifiées (par période) par le PDP dans le même cycle. Au contraire, la nervosité fera référence aux différences entre les quantités planifiées pour la même période calculées dans cycles distincts.

La nervosité est un phénomène important par le fait que des changements mineurs au PDP produisent, lors de l'explosion de la nomenclature, d'importants changements dans le MRP (Material Requirements Planning). Dans [3] par exemple, les auteurs expriment que ces changements initiaux au PDP peuvent être causés par des variations de

la demande, ou par des règles de lotissement inadaptées.

Comme on peut lire dans [5], si un critère de stabilité est considéré pour le PDP, il est alors nécessaire d'établir un compromis entre le coût de celle-ci et le coût global objectif. Effectivement, quand un PDP est calculé sans prendre en compte ces considérations, le plan obtenu peut présenter des différences notables entre les quantités à produire par période. Cette situation rend le plan plus difficile et donc plus coûteux à mettre en oeuvre à l'atelier. La somme de ces surcoûts est donc à comparer avec le coût induit par cette recherche de stabilité qui peut, par exemple, se traduire par des surstocks de composants ou de produits finis.

L'approche présentée ici, vise à réduire l'instabilité et la nervosité de façon dynamique. Pour cela, un modèle de programmation linéaire entière mixte est proposé sur un horizon glissant, pour le calcul du PDP. Ce modèle a la particularité de considérer la réduction de l'instabilité et de la nervosité du PDP directement dans sa formulation, avec l'objectif de ne pas augmenter considérablement le coût total. Nous proposons de le faire grâce à l'inclusion d'un critère qui cherche la réduction de l'instabilité du PDP par la pondération d'un facteur qui n'affecte pas significativement le coût total, mais qui au contraire, force le modèle à chercher des solutions pour les objectifs désirés. Un autre objectif qui est recherché dans la nouvelle formulation réside dans le fait de ne pas augmenter significativement la complexité du problème. Pour cela nous proposons d'inclure une condition simple qui réduit l'instabilité et la nervosité. Nous détaillerons cela dans la Section III. Par conséquent, notre travail cherche à étudier empiriquement les deux hypothèses suivantes :

1. Par la formulation proposée, considérer directement la minimisation de l'instabilité du PDP n'affectera pas significativement le coût total du programme.
2. Une instabilité plus petite du MPS réduit, ou dans le pire cas, n'affecte pas la nervosité du MPS.

Ce travail s'inscrit dans la continuité de divers travaux de l'équipe "Système Produit" du CRAN, mais plus généralement de différentes équipes de la communauté française du GDR MACS.

La suite de ce papier est organisé comme suit : dans la Section II nous avons réalisé une revue de la bibliographie de quelques contributions récentes relatives à la stabilisation des PDP. La Section III définit formellement un modèle qui considère directement un critère conduisant à cette stabilisation. Une application par simulation sur un horizon glissant est mise en oeuvre dans la Section IV. La Section V présente les conclusions et les futures orientations de nos travaux.

II. REVUE DE LA BIBLIOGRAPHIE

Il existe beaucoup de travaux dans la littérature qui analysent l'effet de la nervosité, son impact sur les plannings de production et sur le système industriel. Nous avons choisi de ne présenter, selon une chronologie temporelle, que quelques récentes contributions.

La première référence analysée est le travail développé dans [3]. Cet article montre l'effet, sur la stabilité des plans, de l'application de quelques règles de lotissement spécifiques et de sélections particulières de positionnements de

bornes de planification (conduisant donc à la détermination de périodes gelées). L'étude en question est mise en oeuvre, par simulation, à partir de méthodes statistiques pour analyser ces interactions entre ces possibilités différentes de configuration du système de gestion. Les résultats montrent une dépendance forte entre la stabilité des plans, d'une part, et les règles de lotissement et la position des bornes de planification, d'autre part. D'autres travaux réalisent des études similaires pour différentes règles de lotissement, voir [4] et [5].

Dans une perspective d'établissement de modèles de planification de la production, [6] explique l'impact de la stabilité à travers trois cas de PDP dans lesquels des stratégies différentes sont mises en oeuvre pour la mesurer. Ainsi, et pour ce problème de PDP, quelques approches sont proposées pour mesurer cette stabilité en simulation et son effet en fonction de différentes structures de coûts. Au final, une méthode itérative est proposée pour le modèle de PDP prenant en compte, directement dans la formulation, la stabilité.

Dans [7], trois méthodes sont proposées pour réduire la nervosité dans des PDP. Les deux premières correspondent à des modifications des classiques modèles de Wagner-Within et de Silver-Meal, et en conclusion, il est proposé une approche basée sur la MILP (Mixed Integer Linear Programming) qui prend en compte les périodes passées pour le calcul du PDP. Les résultats sont analysés par une simulation dans laquelle le modèle MILP obtient, dans quelques cas, de bons résultats en terme de stabilité.

Pour un problème d'ordonnancement [8] propose un modèle d'optimisation conjointe de l'efficacité du système de production et de la stabilité du plan. Dans une première partie du papier, l'inclusion de la stabilité en tant que variable dans le modèle est justifiée. Pour résoudre ce problème une approche par algorithmes génétiques est mise en oeuvre. Les résultats sont analysés statistiquement concluant sur l'importance de considérer cette nouvelle variable dans la génération des plans. Le résultat majeur de cette étude tient dans le fait de montrer que la stabilité n'affecte pas drastiquement l'efficacité.

Analysant les effets de la structure d'une chaîne logistique sur la stabilité, [9] étudie un modèle de lotissement (lot-sizing problem) multi-niveaux multi-articles et considère des variables structurelles telles que les coûts de réglage, les relations entre les composants et la capacité. Les résultats statistiques montrent une relation forte entre les variables considérées et la stabilité. En particulier l'accent est mis sur un résultat évident, à savoir que si le nombre d'ordres de production diminue et que la capacité augmente, cela conduit à stabiliser les plans. Par la suite, [10] étudie l'impact, en terme de stabilité, de la coordination des flux matière dans la chaîne logistique par une approche plus appliquée. Sur la base de ses résultats, il identifie trois variables qui affectent fortement celle-ci : les tailles de lots, le niveau d'incertitude de la demande et la structure du produit. Des résultats très similaires ont été trouvés par [9].

Les références [11] et [12], dans un contexte de processus de refabrication, au niveau PDP considérant des périodes gelées, mettent aussi l'accent sur l'importance de prendre en compte la stabilité dans les systèmes MRP2.

Plus dernièrement, [13], propose une méthode basée sur la programmation mathématique pour tenter d'obtenir un PDP stable. Cette approche est mise en oeuvre par deux niveaux de modélisation : plans agrégés et plans détaillés. Pour les plans agrégés, une procédure appelée plan de référence, est utilisée, elle établit un compromis entre les quantités à produire par périodes successives afin de minimiser les écarts. Au niveau détaillé, une heuristique est proposée pour améliorer la stabilité des PDP. Le résultat essentiel de ce travail tient dans la tentative de préserver la stabilité des plans agrégés lors de la désagrégation en plans détaillés.

Sur la base de cette bibliographie, l'analyse expérimentale de la Section IV, s'appuyant sur les résultats décrits dans les articles ci-dessus, prend en compte le postulat que le système et la structure des coûts affectent fortement la stabilité. Sur cette base, la formulation proposée est mise en oeuvre avec une structure de coûts dans laquelle les coûts de réglage (setup) ont une très grande valeur, ce qui est une situation couramment considérée et difficile à résoudre.

III. MESURES D'INSTABILITÉ ET NERVOUSITÉ ET ANALYSE DE FORMULATIONS

A. Mesures d'instabilité et nervosité

A.1 Mesures d'instabilité

Afin de calculer l'instabilité du PDP, deux formules sont présentées :

$$IME_k^i := \frac{2}{n(n-1)} \sum_{t=k}^{k+n-1} \sum_{t'=k+1}^{k+n} |x_t^i - x_{t'}^i|, \quad (1)$$

qui représente la moyenne de la somme des différences entre une période t et toutes les périodes suivantes (t'), pour un cycle k et par article. Nous appellerons à cette mesure *Instabilité moyenne du PDP*.

De plus nous définissons une autre mesure comme suit,

$$IMA_k^i := \max_t \left\{ \frac{1}{n-t} \sum_{t'=k+t}^{k+n} |x_{k+t-1}^i - x_{t'}^i|, t = 1 \dots, n-1 \right\}, \quad (2)$$

définie comme l'*Instabilité Maximale du PDP*.

A.2 Mesures de nervosité

Soit Ω_{kt} l'ensemble de périodes superposées dans le cycle k pour la période t (ça veut dire, toutes les quantités planifiées pour la période k , calculées dans les cycles précédents). Et soit,

$$\Omega_k = \sum_{t=k}^{n+k} |\Omega_{kt}|, \quad (3)$$

le nombre total de périodes superposées pour le PDP calculé au cycle k , où $|\Omega|$ est le nombre d'éléments de l'ensemble Ω . Alors,

$$NA_k^i = \frac{1}{\Omega_k} \sum_{t=k}^{k+n-1} \sum_{h \in \Omega_{kt}} |x_t^i - x_h^i| \quad (4)$$

représente la nervosité du PDP calculée comme la somme des différences entre la quantité planifiée dans le cycle k

pour la période t et tout les cycles précédentes pour la même période, avec $t = k, k+1, \dots, k+n-1$ (la dernière période n'a pas de période superposée).

Une autre mesure considérée concerne le calcul de la nervosité en tant que différence entre la quantité planifiée dans le cycle k pour la première période f et toutes les quantités planifiées pour la même période dans les cycles précédents. Cette mesure est motivée pour le fait que, avec $\Delta = 1$, la quantité implémentée réellement est seulement la première, pour tous les cycles. Nous pouvons exprimer cette mesure comme,

$$NF_k^i = \frac{1}{|\Omega_{kf}|} \sum_{h \in \Omega_{kf}} |x_k^i - x_h^i|, \quad (5)$$

où Ω_{kf} représente l'ensemble de périodes superposées dans le cycle k pour la première période calculée.

B. Formulations

B.1 Formulation Classique

La formulation d'un programme directeur de production pour m articles et n périodes, peut être établie comme suit :

Variables

- x_t^i : quantité à produire par article i dans la période t .
 - s_t^i : stock par article i dans la période t .
 - y_t^i : nombre de réglages par article i dans la période t , où
- $$y_t^i = \begin{cases} 1 & \text{si } x_t^i > 0 \\ 0 & \text{si } x_t^i = 0 \end{cases}$$

Paramètres

- d_t^i : demande par article i dans la période t .
 - p_t^i : coût unitaire de production de l'article i dans la période t .
 - h_t^i : coût unitaire de stock de l'article i dans la période t .
 - q_t^i : coût de réglage de l'article i dans la période t .
 - L_t^k : capacité disponible dans la période t pour la ressource k .
 - α^{ik} : consommation de la ressource k pour la production de l'article i .
 - β^{ik} : consommation de la ressource k pour le réglage de l'article i .
 - M_t^i : limite supérieure de production de l'article i dans la période t , où
- $$M_t^i = \sum_{i=t}^n d_t$$

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n (p_t^i x_t^i + h_t^i s_t^i + q_t^i y_t^i) \quad (6)$$

$$s_{t-1}^i + x_t^i = d_t^i + s_t^i, \quad \forall i, t \quad (7)$$

$$x_t^i \leq M_t^i y_t^i, \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha^{ik} x_t^i + \sum_{i=1}^m \beta^{ik} y_t^i \leq L_t^k, \quad \forall k, t \quad (9)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{mn}, s \in \mathbb{R}_+^{m(n+1)}, y \in \{0, 1\}^{mn}, \quad (10)$$

La fonction objectif cherche à minimiser le coût de production, le coût de stock et le coût de réglage. La contrainte

(7) représente le stock projeté et la contrainte (8) la relation entre les activités de réglage et de production. La contrainte (9) représente la capacité disponible des ressources par période. Cette formulation peut être trouvée dans [14]. Nous désignerons cette formulation en tant que *formulation classique*.

B.2 Formulation sans variable stock (F_1)

Sans perte de généralité, nous considérons l'hypothèse de $s_0 = 0$, et en utilisant l'identité,

$$s_n^i = \sum_{t=1}^n (x_t^i - d_t^i), \forall i. \quad (11)$$

Il est possible d'éliminer la variable de stock dans la formulation. On peut trouver cette formulation, pour un problème de lotissement mono-article (SILSP), dans [15]. Dans notre cas, la formulation précédente est appliquée à un problème de lotissement et de capacité multi-articles (CMILSP). Ainsi, le modèle proposé peut être formulé comme suit,

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n ((p_t^i + \sum_{j=t}^n h_j^i) x_t^i + q_t^i y_t^i) \quad (12)$$

$$\sum_{t'=1}^t x_{t'}^i \geq D_t^i, \quad \forall i, t \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (13)$$

$$\sum_{t'=1}^n x_{t'}^i = \sum_{k=1}^n d_k^i, \quad \forall i \quad (14)$$

$$x_t^i \leq M_t^i y_t^i, \quad \forall i, t \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha^{ik} x_t^i + \sum_{i=1}^m \beta^{ik} y_t^i \leq L_t^k, \quad \forall k, t \quad (16)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{mn}, y \in \{0, 1\}^{mn} \quad (17)$$

Dans ce modèle, la fonction objectif cherche à minimiser seulement le coût de production et le coût de réglage. Cela est possible parce que la variable stock (s) a été exprimée en fonction de la variable production (x), en obtenant ainsi, un nouveau coût de production (p). La contrainte (13) exprime que la production cumulée pour chacune des périodes (sauf la dernière) et pour chacun des articles, doit être égale ou plus grande que la demande cumulée, D_t^i , dans la même période. Backlog n'est pas permis et pour la dernière période la relation est une égalité au sens strict (14). Notons que dans (12), un terme constant $-\sum_{i,t} h_t^i \bar{d}_t^i$ a été éliminé de la fonction objectif (voir [15]). La valeur de la fonction objectif originale peut être obtenue soit, en additionnant directement le terme enlevé à la fonction objectif (12), ou soit par l'obtention de la variable s depuis (11) qui sera évaluée dans (6). Dans la suite, cette formulation sera appelée F_1 .

B.3 Formulation avec stabilité du PDP (F_2)

Pour prendre en compte directement la stabilité du PDP dans le modèle la formulation peut être exprimée comme suit,

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^n ((p_t^i + \sum_{j=t}^n h_j^i) x_t^i + q_t^i y_t^i) + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^{n-1} \lambda^i \omega_t^i \quad (18)$$

$$\sum_{t'=1}^t x_{t'}^i \geq D_t^i, \quad \forall i, t \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (19)$$

$$x_t^i - x_{t+1}^i \leq \omega_t^i, \quad \forall i, t \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (20)$$

$$x_{t+1}^i - x_t^i \leq \omega_t^i, \quad \forall i, t \in \{1, 2, \dots, n-1\} \quad (21)$$

$$x_t^i \leq M_t^i y_t^i, \quad \forall i, t \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha^{ik} x_t^i + \sum_{i=1}^m \beta^{ik} y_t^i \leq L_t^k, \quad \forall k, t \quad (23)$$

$$x \in \mathbb{R}_+^{mn}, \omega \in \mathbb{R}_+^{m(n-1)}, y \in \{0, 1\}^{mn}, \quad (24)$$

où la fonction objectif est la même que dans F_1 , en ajoutant un terme qui cherche à minimiser la différence entre les quantités planifiées pour les périodes consécutives dans le même cycle. Notons que ce terme, plus les contraintes (20) et (21), est équivalent à minimiser $|x_t^i - x_{t+1}^i|, \forall i, t \in \{1, 2, \dots, n-1\}$. Il faut remarquer que cette relation n'est pas égale aux mesures considérées pour mesurer l'instabilité, parce que la différence est simplement minimisée entre les périodes consécutives. Ceci est réalisé pour ne pas augmenter considérablement la complexité du problème, en particulier, en ce qui concerne le nombre de contraintes. Ainsi, la variable ω_t^i représente une variable auxiliaire, dont l'objectif est de minimiser la différence entre les quantités affectées à toutes les périodes consécutives sur l'horizon de planification n , et λ^i représente un paramètre associé à l'importance de l'instabilité pour chaque article. De plus, en ajoutant ce critère simple à minimiser, mis en rapport principalement avec la réduction de l'instabilité, on cherche à diminuer aussi la nervosité. Les contraintes (22) et (23), sont les mêmes que pour la formulation F_1 . Par contre, dans la contrainte (19), nous avons exprimé les contraintes (13) et (14), comme une inégalité. Dans ce qui suit, cette formulation sera appelée F_2 .

IV. SIMULATION

A. Conception de l'expérimentation

La simulation a été mise en oeuvre pour un horizon glissant de planification de 52 semaines, avec une fréquence $\Delta t = 1$ et pour un horizon de production $n = 8$. L'objectif est de simuler les plans générés pour chaque période, sur tout l'horizon de planification calculé avec les modèles F_1 et F_2 , et de comparer, cycle par cycle, le coût total du plan, les deux mesures d'instabilité définies en (1) et (2), ainsi que les deux mesures d'instabilité définies en (4) et (5).

Les paramètres $d_t^i, p_t^i, h_t^i, q_t^i$ sont générés de façon aléatoire et distribués uniformément à intervalles spécifiques. Ces paramètres établissent la configuration du système de production, la Table I synthétise ces informations.

La demande pour le première cycle est générée de façon aléatoire, avec une distribution uniforme entre les paramètres d' et d'' , comme suit :

$$d_{1t'} \sim U(d', d''), t' = 1, \dots, n. \quad (25)$$

TABLE I
PARAMÈTRES

paramètre	valeur
demande (d)	$U([100,140])$
production (p)	$U([95,105])$
stock (h)	$U([95,105])$
réglage (q)	$U([10000,20000])$
capacité (L)	150
α	$U([0.1,0.2])$
β	$U([2,3])$
λ	10

Ainsi la demande pour les cycles suivants sera :

$$d_{kt'} = d_{(k-1)t'} + \epsilon_{t'}, t' = k, \dots, k+n-1, k \geq 2 \quad (26)$$

où $\epsilon_{t'}$ représente l'erreur aléatoire pour la période t' . A chaque nouvelle dernière période une demande est générée, comme suit :

$$d_{k(k+n)} \sim U(d', d'') \quad (27)$$

$$\epsilon_{t'} \sim U[0, ct'], t' = 1, \dots, n, c \in \mathbb{N}, \quad (28)$$

avec le paramètre c pour gérer la variance de l'erreur. La demande est exprimée pour le cas d'un simple article, mais évidemment peut être facilement étendue au cas de multiples articles.

Le paramètre de capacité L_t^k doit être cohérent avec les contraintes (13)-(14)-(16) et (19)-(23) dans les modèles F_1 et F_2 respectivement. Pour assurer la faisabilité (pour le cas mono-article voir [16]), ce paramètre est fixé à la valeur 150 (voir Table I). On considère aussi, $k = 1$, en supposant que cette ressource est un goulot du système.

B. Résultats

Toutes les figures ont été générées en représentant dans un graphique la différence relative entre les formulations F_1 et F_2 , pour les différentes mesures étudiées. C'est à dire que si $M(F)$ représente une mesure (coût total, instabilité ou nervosité), obtenue par la formulation F , alors la ligne continue représente :

$$\frac{M(F_2) - M(F_1)}{M(F_1)} \quad (29)$$

La ligne discontinue représente la valeur moyenne de cette différence relative. Comme nous l'avons antérieurement exprimé, la simulation a été réalisée pour un horizon opérationnel de 52 périodes, cependant, les mesures sont exprimées dans les graphiques seulement dans l'intervalle [8, 45], car dans cet intervalle la quantité de périodes superposées dans chaque période est la même (n). Cela a été réalisé avec l'intention de comparer toutes les périodes dans les mêmes conditions.

En observant les valeurs moyennes des différences relatives, pour les différentes mesures, on peut voir par exemple, une réduction proche à 30% en terme d'instabilité et une réduction proche de 20% en terme de nervosité,

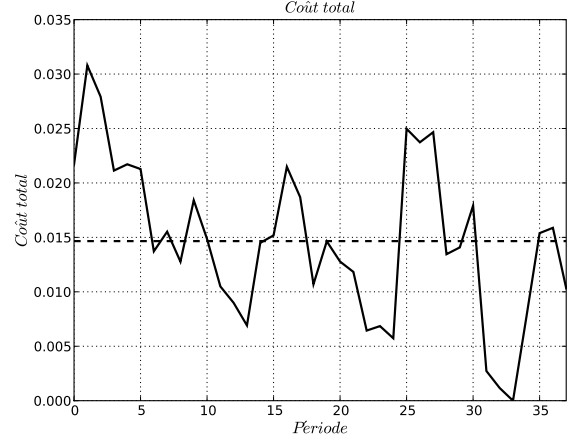


Fig. 1. Différence du coût total entre F_1 et F_2 .

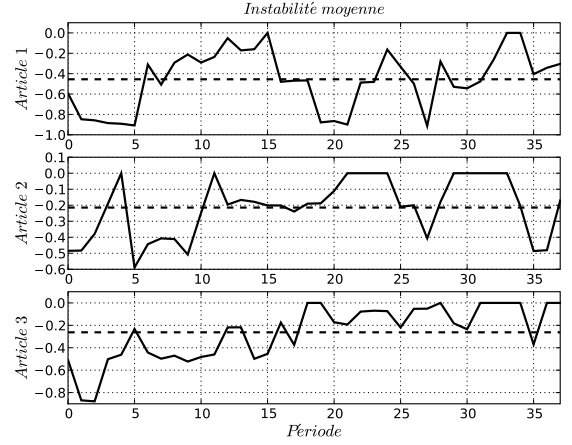


Fig. 2. Différence de l'instabilité moyenne (IME_k^i) entre F_1 et F_2 .

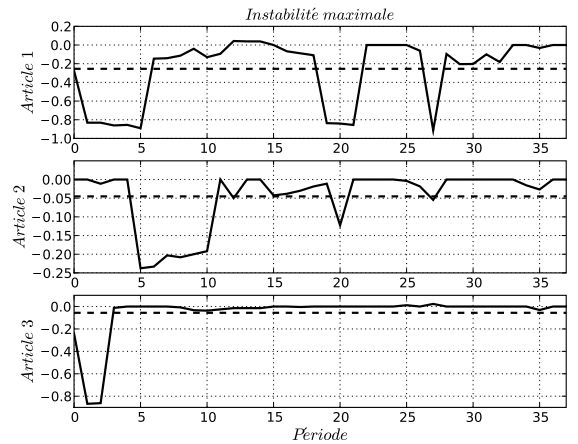


Fig. 3. Différence de l'instabilité maximale (IMA_k^i) entre F_1 et F_2 .

pour chacune des mesures. D'autre part, ces améliorations en termes d'instabilité et de nervosité ont été obtenues avec seulement une augmentation en moyenne de 1.5% du coût total, dans chacun des plans générés.

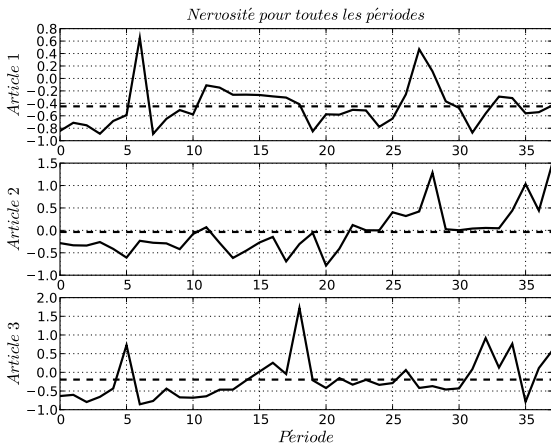


Fig. 4. Différence de la nervosité calculée pour toutes les périodes surposées (NA_k^i) entre F_1 et F_2 .

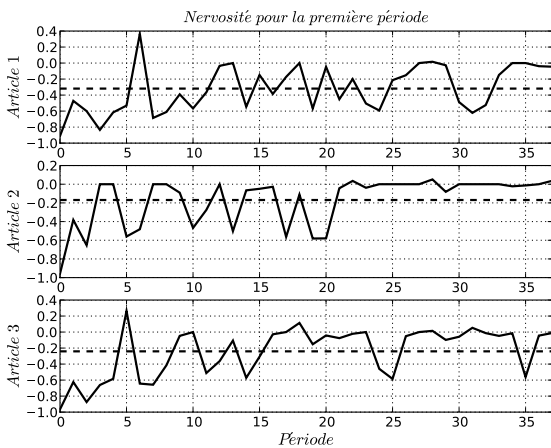


Fig. 5. Différence de la nervosité calculée pour la première période et ses périodes superposées (NF_k^i) entre F_1 et F_2 .

V. CONCLUSION

Dans le présent document, est proposé un modèle de Programme Directeur de Production (PDP) qui prend en compte, directement dans sa formulation, un critère de stabilité. Les résultats expérimentaux montrent que cette formulation conduit à un PDP plus stable sans une grande différence en terme de coût total. Les résultats détaillés analysés montrent que le modèle maintient un niveau de coût raisonnable. Par conséquent, dans nos futurs travaux, notre idée est d'améliorer cette formulation en intégrant le problème de l'explosion de la nomenclature produit pour le calcul des plans détaillés par composants et pour préserver cette stabilité en tenant compte de la possibilité d'avoir des compléments de capacité.

Par ailleurs, la formulation proposée montre une certaine simplicité par rapport à la formulation classique du problème, elle permet encore d'adapter l'importance que va avoir la stabilité dans le plan par l'ajustement des paramètres.

Finalement, nous avons étudié le cas où les coûts de réglage sont beaucoup plus grands que les autres coûts. Dans ce cas, ces coûts ont une position dominante, à savoir un

impact majoritaire sur le coût total. A l'évidence, si le coût de réglage est exorbitant, le modèle proposera un plan où les tailles de lots seront maximales pour un seul réglage pour une référence produit. C'est une forme de stabilité qui ne privilégie pas le service client. Cependant, la formulation peut quand même aider à trouver des programmes stables de compromis entre nombre de réglages à minimiser et nombre de références à produire.

RÉFÉRENCES

- [1] P. GENIN, S. LAMOUREI et A. THOMAS : Sales and operations planning optimisation. In A. DOLGUI, J. SOLDEK et O. ZAIKIN, éditeurs : *Supply Chain Optimisation*, volume 94, pages 191–204. Springer US, Boston, 1st édition, 2005.
- [2] P. GENIN, A. THOMAS et S. LAMOUREI : How to manage robust tactical planning with an aps (advanced planning systems). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(2):209–221, 2007.
- [3] X. ZHAO et K. LAM : Lot-sizing rules and freezing the master production schedule in material requirements planning systems. *International Journal of Production Economics*, 53(3):281–305, 1997.
- [4] J. XIE, T.S. LEE et X. ZHAO : Impact of forecasting error on the performance of capacitated multi-item production systems. *Computers & Industrial Engineering*, 46(2):205–219, 2004.
- [5] J. XIE, X. ZHAO et T.S. LEE : Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 83(1):65–84, 2003.
- [6] A. KIMMS : Stability measures for rolling schedules with applications to capacity expansion planning, master production scheduling, and lot sizing. *Omega*, 26(3):355–366, 1998.
- [7] O. KAZAN, R. NAGI et C.M. RUMP : New lot-sizing formulations for less nervous production schedules. *Computers & Operations Research*, 27(13):1325–1345, 2000.
- [8] R. RANGSARITRATSAMEE, W.G. FERRELL JR. et M. BETH KURZ : Dynamic rescheduling that simultaneously considers efficiency and stability. *Computers & Industrial Engineering*, 46(1):1–15, 2004.
- [9] M. MEIXELL : The impact of setup costs, commonality, and capacity on schedule stability : An exploratory study. *International Journal of Production Economics*, 95(1):95–107, 2005.
- [10] K. van DONSELAAR, J. van den NIEUWENHOF et J. VISSCHERS : The impact of material coordination concepts on planning stability in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 68(1):169–176, 2000.
- [11] K. RICHTER et M. SOMBRUTZKI : Remanufacturing planning for the reverse wagner/whitin models. *European Journal of Operations Research*, 121(2):304–315, 2000.
- [12] O. TANG et R.W. GRUBBSTROM : Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 78(3):323–334, 2002.
- [13] A. THOMAS, P. GENIN et S. LAMOUREI : Mathematical programming approaches for stable tactical and operational planning in supply chain and aps context. *Journal of Decision Systems*, 17:425–455, 2008.
- [14] Y. POCHEI et L.A. WOLSEY : *Production planning by mixed integer programming*. Springer New York, New York, 2006.
- [15] N. BRAHIMI, S. DAUZERE-PERES, N.M. NAJID et A. NORDLI : Single item lot sizing problems. *European Journal of Operations Research*, 168(1):1–16, 2006.
- [16] Y. POCHEI et L.A. WOLSEY : Single item lot-sizing with non-decreasing capacities. *Mathematical Programming Serie A*, 2008.