

OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT D'UN ATELIER DE PRODUCTION BASE SUR LES ORDONNANCEMENTS DES SCENARIOS DE PRODUCTION PREVISIONNELS : Cas d'un flow-shop hybride

T. CHAARI¹, S. CHAABANE²

¹Faculté des Sciences Economiques et de Gestion de Sfax (FSEGS), Route de l'aérodrome km 4.5 B .P 1088
3018 Sfax- Tunisie
tarek.Chaari@meletu.univ-valenciennes.fr,
sondes.chaabane@univ-valenciennes.fr

T. LOUKIL¹, D. TRENTESAUX²

²LAMIH (CNRS), Université de Valenciennes et du Hainaut
Le Mont-Houy, 59313 Valenciennes Cedex
Taicir.Loukil@fsegs.rnu.tn,
damien.trentesaux@univ-valenciennes.fr

RESUME : La conception constitue une des étapes la plus importante dans le cycle de vie d'un atelier de production. Un des problèmes à soulever est le dimensionnement des ressources. Un sur ou un sous dimensionnement provoquera des sur-coûts supplémentaires. Il conditionnera aussi l'ordonnancement pendant la phase d'exploitation. Nous proposons dans ce papier une approche d'optimisation du dimensionnement d'un atelier de production basé sur les ordonnancements des scénarios de production prévisionnels. Nous nous intéressons à une organisation de flow shop hybride à plusieurs étages. En effet, nous proposons un programme linéaire permettant de minimiser conjointement le C_{max} et le nombre de machines dans chaque étage pour un ensemble de jobs types de l'activité prévisionnelle. Un poids est attribué à chacun des objectifs. Au vu des résultats obtenus, cette approche peut fournir des solutions exactes pour des problèmes de petites tailles. Dans le cas où le poids attribué à chaque objectif est le même nous obtenons des solutions dites de « compromis ». Ces solutions de compromis ont permis de minimiser les coûts totaux.

MOTS-CLES : Dimensionnement, ordonnancement, flow-shop hybride, optimisation, programmation linéaire.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, les entreprises manufacturières sont confrontées constamment à la croissance accrue de la concurrence augmentée par les innovations technologiques, les changements de l'environnement du marché et les évolutions des demandes des clients. Cette situation critique a nécessité une révision des visions stratégiques et de la pratique des modèles conventionnels et classiques (Sharifi et Zhang, 1999). Il était donc nécessaire de développer et d'améliorer la flexibilité organisationnelle. Dans le passé, la majorité des entreprises ont adopté la restructuration et la ré-ingénierie pour répondre aux exigences des clients et de la demande. Malheureusement ces mesures se sont avérées insuffisantes (Sutcliffe, 1999). Une nouvelle caractéristique des entreprises a émergé suite à ces évolutions c'est la notion d' « agilité ». Une entreprise doit être agile, capable de proposer de nouvelles approches, méthodes et outils d'exploitation des ateliers de production lui permettant de réagir rapidement aux changements de marché et les demandes des clients. Cette notion d'agilité trouve son succès dans l'intégration des systèmes d'informations et des nouvelles technologies, la gestion et l'exploitation des ressources humaines et matérielles, la maîtrise des processus de production et la mise en place d'une organisation flexible (Ching-Torng *et al.*, 2006).

Pour intégrer ces nouvelles caractéristiques d'agilité et de flexibilité, la conception d'un atelier de production est

une étape essentielle du cycle de vie des systèmes de production puisqu'elle conditionne son exploitation (Korbaa, 2003). Cette étape peut revenir constamment même en phase d'exploitation dans le but de réorganiser ou restructurer le système afin de répondre aux changements du marché et de la demande des clients.

Le but de la conception consiste à déterminer le nombre, les dimensions et la disposition des équipements nécessaires pour chacune des opérations unitaires de production intervenant dans les procédés d'élaboration des différents produits. L'objectif est d'assurer un niveau de production donné, tout en optimisant un ou plusieurs critères technico-économiques.

Dans un contexte où les cycles de vie des produits se réduisent, la problématique de dimensionnement des ateliers de production trouve son intérêt pour des raisons économiques. En effet si nous allouons trop de ressources, alors le capital est dépensé dans des investissements inutiles donc c'est de l'agent perdu. Si au contraire nous utilisons un nombre trop bas de machines, le système ne pourra pas produire les quantités désirées ni respecter les délais, ce qui constituent de l'argent perdu. Le problème de dimensionnement d'atelier est donc de déterminer le nombre de chaque type de ressources ou d'opérateurs nécessaire pour réaliser une bonne performance en exploitation (Feyzioglu *et al.*, 2005).

En plus de l'aspect économique, la phase de conception est fortement liée à la phase d'exploitation. En effet, le système ainsi conçu conditionnera les différents ordonnancements. Le nombre des différentes ressources définies, le nombre des opérateurs choisis, la disposition des machines,... seront des contraintes pour les ordonnancements (respect de nombre maximal des machines, respect de la disponibilité des ressources, respect des contraintes de précédences des jobs obtenus par la disposition des ressources et la circulation des flux, ...). Ceci montre que les problèmes de dimensionnement (à la phase de conception) et d'ordonnement (à la phase d'exploitation) sont fortement liés.

La question est alors de savoir pourquoi nous ne tenons pas compte de la performance des ordonnancements dès la phase de conception. Il s'agit donc de proposer dès la phase de conception un dimensionnement de l'atelier (nombre de chaque type de machines, opérateurs et stocks, ...) qui est le moins coûteux mais qui assure l'obtention de bons ordonnancements respectant les critères de performance de l'activité de production. Ceci revient donc à prendre la décision de dimensionnement en tenant compte des performances des ordonnancements.

L'objectif de ce papier est alors de proposer une approche de résolution des problèmes de dimensionnement en tenant compte de la diversité des ordonnancements possibles, répondant à des besoins clients estimés (étude marketing, reconduction de contrat clients, objectifs de l'entreprise, ...).

Nous nous intéressons à un problème connu dans l'industrie : le problème des Flow-shop hybrides. Des travaux de recherche se sont intéressés à ce type d'organisation et aux problèmes d'ordonnement associés. Pour avoir plus d'informations le lecteur peut se référer aux travaux de (Vignier *et al.*, 1999), (Riane, 1998) et (Guinet *et al.*, 1996).

Ce papier est structuré selon six sections. Après un état de l'art dans la section 2 et une description du problème dans la section 3, la section 4 présente l'approche d'optimisation du dimensionnement basé sur les ordonnancements proposée. Les expérimentations font l'objet de la cinquième section. Nous terminons par une conclusion et des perspectives dans la sixième et dernière section.

2. ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES DE RESOLUTION DES PROBLEMES DE DIMENSIONNEMENT DES ATELIERS DE PRODUCTION

Beaucoup de travaux ont traité les problèmes de conception (plus précisément de dimensionnement) des ateliers de production. A notre connaissance peu de travaux se sont intéressés au dimensionnement tout en

anticipant les problèmes d'ordonnement dès la phase de conception.

Nous présentons dans cette partie l'état de l'art sur les approches de résolution des problèmes de dimensionnement.

Ces dernières peuvent être classées en quatre groupes : les approches analytiques, les approches basées sur l'optimisation, les approches basées sur la simulation et les approches d'optimisation-simulation.

2.1. Les approches analytiques

L'utilisation des approches analytiques pour les problèmes de dimensionnement a fait l'objet d'un certain nombre d'articles. Malheureusement, ces approches se caractérisent par la nécessité de certaines hypothèses restrictives. La plupart de ces travaux portent sur des techniques de modélisation telles que les réseaux de file d'attente, les réseaux de Petri et les chaînes de Markov (Askin et Standridge, 1993), (Proth et Xie, 1994) et (Govil et Fu, 1999).

Ces techniques souffrent principalement de leur niveau d'abstraction et de leur incapacité de représenter certaines caractéristiques réelles, telles que l'indisponibilité d'une palette de transport, les collisions des véhicules, les machines à vitesses multiples, l'existence d'une machine bloquante, les conséquences des pannes, etc...

2.2. Les approches basées sur l'optimisation

(Aubry *et al.*, 2005) ont développé une technique de configuration robuste d'un atelier de photolithographie constitué de machines parallèles partiellement multifonctions (c'est à dire chaque machine capable de traiter un sous ensemble de produits). L'objectif considéré est la minimisation des coûts liés à la configuration de l'atelier (machines). Cette configuration permettra de garantir les performances d'équilibre de la charge tout en tenant compte des incertitudes sur la demande des produits. L'évaluation de ces incertitudes se traduit par la définition et le calcul du rayon de stabilité qui mesure l'amplitude maximale d'une perturbation sur la demande. Cette mesure a amené à considérer le problème de compromis entre la robustesse et le coût de l'atelier. Le critère de robustesse considéré est la maximisation du taux d'occupation des machines (c'est à dire que les machines ne doivent jamais être oisives et doivent finir leur production en même temps malgré les incertitudes sur la demande). Pour résoudre ce type de problème, les auteurs ont utilisé la Procédure par Séparation et Évaluation (PSE).

Dans un autre travail, (Aubry *et al.*, 2006), ont essayé de généraliser leur idée tout en traitant le problème du parc de machines parallèles multifonctions. L'objectif était de trouver un meilleur compromis entre le coût et la

robustesse. De ce fait, le problème traité est un problème d'optimisation bi-critères. Les critères considérés sont le coût de configuration qui est un critère à minimiser (la minimisation du coût de qualification) et le critère de la maximisation de la robustesse contre les incertitudes sur la demande. Pour résoudre ce problème, une procédure par Séparation et Évaluation (PSE) a été développée. L'objectif de cette méthode est de maximiser la robustesse d'une configuration dans laquelle le coût est fixe.

2.3. Les approches basées sur la simulation

La simulation permet la considération de différents événements aléatoires dans les systèmes de production, tels que : l'arrivée des ordres de fabrication, l'arrivée des pièces ou de matières premières, le temps d'inspection, le temps de chargement/déchargement, le temps d'installation, ... On peut aussi observer le comportement dynamique d'un système en fonctionnement (par exemple les pannes). Ces qualités et ces possibilités de modélisation d'un éventail de systèmes complexes ont rendu les techniques de simulation parmi les techniques les plus utilisées et appliquées pour résoudre les problèmes de dimensionnement.

(McHaney et Douglas, 1997) ont utilisé la simulation et l'analyse de régression (avec la conception des expériences) pour déterminer le nombre de véhicules autoguidés (Automated Guided Vehicule), et d'opérateurs. (Czarnecki *et al.*, 1997) ont simulé l'impact de l'ajout d'un nouvel équipement au système de production dans le but de satisfaire la demande. (Williams et Gevaert, 1997) ont étudié par la simulation l'effet du nombre de palettes par rapport aux taux de production dans le cas d'une industrie automobile.

(Dumbrava, 1997) a essayé de présenter l'avantage de la simulation dans la conception des ateliers flexibles (Flexible Management System). Le nombre de machines dans chaque groupe est déterminé pour réduire la capacité des stocks et la durée des processus et pour obtenir un bon compromis entre le nombre de machines et la productivité du système. (Law et Kelton, 2000) ont modélisé et identifié le nombre correct de conteneurs et d'élévateurs dans un atelier d'assemblage pour réduire les investissements et les coûts d'inventaires.

(Patel et al., 2002) ont simulé une industrie de fabrication de moteurs de véhicules et ont changé, un par un, le nombre d'opérateurs, les stations mécaniques et les stations de peinture pour déterminer leur taille optimale et augmenter le taux de production.

2.4. Les approches optimisation-simulation

Des méthodes intégrant des techniques d'optimisation et de simulation ont été appliquées à divers problèmes de dimensionnement. (Choon, 1991) a déterminé le nombre de chaque type de machine, le nombre de véhicules au-

to-guidés et la capacité des stocks en amont et en aval de chaque machine. La méthode de résolution utilisée est la procédure de recherche aléatoire couplée avec la simulation.

(Pierreval et Tautou, 1997) ont déterminé le nombre de ressources d'un atelier de production des pots de yaourt en plastique en utilisant les algorithmes évolutionnaires.

(Spieckermann *et al.*, 2000) ont essayé de trouver une disposition efficace satisfaisant le taux de production désiré pour une compagnie de fabrication de voitures en réduisant le nombre des stocks et la durée de cycle. Ils ont employé les algorithmes génétiques et le recuit simulé dans leur modèle de simulation.

(Feyzioglu *et al.*, 2005) ont minimisé le nombre de ressources (machines) sous contraintes des critères de performance. Le problème a été défini comme un problème d'optimisation stochastique multi-critères basé sur la simulation.

Nous avons remarqué dans tous ces travaux l'absence de considération des problèmes d'ordonnancement. Les techniques et approches proposées ont été élaborées pour définir le nombre de machines, dimensionner les stocks, définir les temps des cycles, ... L'ordonnancement sera considéré seulement dans la phase d'exploitation ayant comme données et contraintes le dimensionnement et la configuration déterminés en phase de conception.

3. DESCRIPTION DU PROBLEME

Le problème consiste à dimensionner les machines dans un atelier de production en tenant compte de la performance et de type des ordonnancements prévisionnels. Une organisation de type flow shop hybride qui constitue notre cas d'étude sera présentée dans ce papier.

Il s'agit d'ordonner un ensemble de n jobs types qui sont représentatifs des scénarios de production possibles $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ dans un atelier de production composé de plusieurs étages k et de déterminer le dimensionnement de chaque étage (le nombre M_t de machines composant chaque étage).

Chaque job J_i est constitué de k opérations types O_{jt} : avec O_{jt} est l'opération du job j traitée par l'étage t .

L'étage t contient un ensemble de $M_{\max}^t \geq 1$ machines parallèles identiques, ce qui signifie que les jobs peuvent être exécutés indifféremment sur l'une ou l'autre des machines d'un même étage. Chaque job doit passer sur une des machines dans chaque étage.

Une fois que l'exécution d'un job a débuté sur une machine, celle-ci ne peut pas être interrompue. Ceci revient à dire que l'ordonnancement est non préemptif. Le job ne peut pas être exécuté dans des différentes

machines. Aucun job ne peut commencer sur cette machine avant la fin du job en cours.

Pour chacun des jobs, l'ordre de passage des opérations dans les k étages est le même : $O_{j1}O_{j2}...O_{jt}$. Une machine M_{it} avec $i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t$ et $t = 1, 2, \dots, k$ ne peut exécuter qu'un seul job à la fois.

Le temps opératoire du job j à l'étage t est noté P_{jt} (les temps de montage, de transport, de décharge... sont contenus dans le temps opératoire du job).

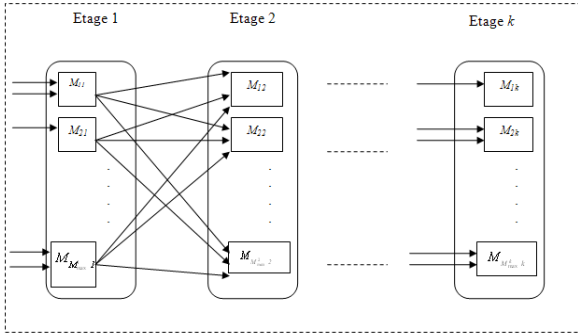


Figure 1. Flow Shop Hybride à k étages

L'objectif de notre étude est donc de trouver le meilleur dimensionnement de machines qui minimise le nombre de machines utilisées dans chaque étage tout en minimisant le C_{\max} .

Nous présentons dans ce qui suit l'approche de résolution du problème.

4. OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT BASE SUR LES ORDONNANCEMENTS

Dans cette partie nous proposons une approche intégrant la résolution du problème de dimensionnement basé sur les ordonnancements prévisionnels.

L'objectif de ce programme est de proposer un compromis entre le nombre de machines à affecter dans chaque étage et la date d'achèvement des travaux (C_{\max}).

4.1. Paramètres et variables

Paramètres et données

- t Indice de l'étage, $t = 1, 2, \dots, k$;
- M_{\max}^t Nombre maximal de machines parallèles dans l'étage t ;
- i Indice de machine, $i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t$;
- $Cout_{it}$ Cout de la machine i à l'étage t
- B Une grande valeur positive;
- λ Une valeur donnée par l'utilisateur ($\lambda \in [0, 1]$)

Paramètres de l'activité prévisionnelle

- j, l Indice de Job types, $j, l = 1, 2, \dots, n$;
- P_{jt} Temps d'exécution estimée du job type j dans l'étage t ;

Variables

- C_{jt} Temps d'achèvement du job j dans l'étage t ;
- C_{\max} Makespan;

$$X_{ijlt} = \begin{cases} 1 & \text{si le job } j \text{ est exécuté immédiatement avant le job } l \\ & \text{dans la machine } i \text{ à l'étage } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X_{i0lt} = \begin{cases} 1 & \text{si le job } l \text{ est exécuté le premier dans la machine } i \\ & \text{à l'étage } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$X_{ij(n+1)t} = \begin{cases} 1 & \text{si le job } j \text{ est exécuté le dernier dans la machine } i \\ & \text{à l'étage } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$Y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } i \text{ est utilisée dans l'étage } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

4.2. Modèle mathématique

Ce problème est formulé comme suit :

$$\text{Min} \left(\lambda * Ecart(C_{\max}) + (1 - \lambda) * Ecart \left(\sum_{i=1}^{M_{\max}^t} \sum_{t=1}^k Cout_{it} Y_{it} \right) \right) \quad (1)$$

Sujet aux contraintes :

$$\sum_{i=1}^{M_{\max}^t} \sum_{j=0}^n X_{ijlt} = 1 \quad \forall t, l \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{M_{\max}^t} \sum_{l=1}^{(n+1)} X_{ijlt} = 1 \quad \forall t = 1, 2, \dots, k \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^n X_{i0lt} = Y_{it} \quad \forall t = 1, 2, \dots, k \quad \forall i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij(n+1)t} = Y_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t \quad \forall t = 1, 2, \dots, k \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijlt} = \sum_{j=1}^{(n+1)} X_{ijlt} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t \quad \forall t = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

$$X_{ijlt} \leq Y_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t \quad \forall j = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

$$X_{ijlt} = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, M_{\max}^t \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$C_{it} \geq C_{jt} + \sum_{i=1}^{M'_{\max}} X_{ijlt} P_{it} + B \left[\sum_{i=1}^{M'_{\max}} X_{ijlt} - 1 \right] \quad (9)$$

$$\forall t = 1, 2, \dots, k \quad \forall j = 0, 1, \dots, n$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, n \quad \text{et } j \neq l$$

$$C_{it} \geq C_{l(t-1)} + P_{it} \quad \forall t = 2, \dots, k \quad \forall l = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$C_{jk} \leq C_{\max} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$X_{ijlt} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M'_{\max} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, n \quad \forall t = 1, 2, \dots, k$$

$$Y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, M'_{\max} \quad \forall t = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

4.3. Commentaires

La fonction « objectif » est de minimiser simultanément l'écart entre le Makespan et la meilleure date d'achèvement des jobs et l'écart entre le coût de dimensionnement obtenu défini par la somme des coûts des machines parallèles dans chaque étage et le dimensionnement le moins coûteux (équation 1). Afin d'avoir des échelles connues aux deux critères, nous avons normalisé les valeurs correspondantes à ces unités en utilisant la fonction d'utilité (cf. section suivante). Deux approches peuvent être envisageables. Une première qui consiste à permettre à combiner linéairement les deux critères et une deuxième qui permet à l'utilisateur de borner un des deux critères et de minimiser l'autre. Dans ce papier nous avons choisi la première approche et l'implémentation du deuxième est envisageable dans des travaux futurs.

L'ensemble de contraintes (2) et (3) assurent que chaque job est affecté à une seule machine dans chaque étage.

La contrainte (4) assure qu'un seul job est exécuté en première position sur chaque machine à chaque étage (on ne peut pas exécuter deux jobs en même temps sur une seule machine). La contrainte (5) indique qu'un seul job est exécuté en dernière position dans chaque machine à chaque étage. La contrainte (6) impose une séquence de job dans chaque machine pour chaque étage. La contrainte (7) permet de maintenir que le job j affecté dans la machine i à un étage donné est exécuté dans cette même machine à cet étage. La contrainte (8) indique que le job qui a fini son exécution sur une machine dans un même étage ne peut pas être ré-exécuté dans une autre machine à ce même étage.

L'ensemble des contraintes (9)-(11) déterminent le temps d'achèvement de chaque job. La contrainte (9) indique que si le job j est exécuté avant le job l par une même machine dans un étage particulier, le job j complète son exécution avant que le job l ne commence. La contrainte (10) permet d'assurer que chaque job ne peut commencer son exécution dans l'étage $t+1$ que lorsqu'il s'achève dans l'étage t . la contrainte (11) assure que le Makespan doit être supérieur au temps d'achèvement du job j dans le dernier étage k .

Les contraintes (12) et (13) sont des variables binaires de décision qui peuvent prendre la valeur 0 ou 1.

4.4. Définition de la fonction *Ecart* et de la fonction d'utilité *U*

Nous définissons tout d'abord deux bornes pour les valeurs de C_{\max} : la borne Inférieure (*BI*) et la borne supérieure (*BS*).

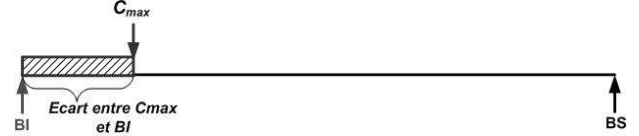


Figure 2. Intervalle des valeurs de C_{\max}

Plus C_{\max} se rapproche de *BI* plus on a un ordonnancement efficace. Et par conséquent un C_{\max} minimal quand l'écart entre *BI* et C_{\max} par rapport à l'intervalle des valeurs de C_{\max} est minimal. Donc l'écart de C_{\max} est défini par :

$$Ecart(C_{\max}) = \frac{C_{\max} - BI}{BS - BI}$$

La borne inférieure est la valeur de C_{\max} minimale que nous pouvons obtenir dans le meilleur des cas. Dans notre cas c'est le C_{\max} obtenu quand le nombre de machines correspond au nombre de jobs à ordonnancer.

$$BI = \text{Max}_{j=1, \dots, n} \left(\sum_{t=1}^k P_{jt} \right)$$

La borne supérieure est la valeur de C_{\max} maximale que nous pouvons obtenir dans le pire des cas. Dans notre cas c'est le C_{\max} obtenu quand nous n'avons qu'une seule machine par étage.

$$BS = \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^k P_{jt}$$

Propriété : $Ecart(C_{\max}) \in [0, 1]$

L'utilité de C_{\max} est donc définie par :

$$U : \mathbb{N} \rightarrow [0, 1]$$

$$C_{\max} \rightarrow 1 - Ecart(C_{\max})$$

Donc :

$$U(BI) = 1 \quad \text{et} \quad Ecart(BI) = 0$$

Et

$$U(BS) = 0 \quad \text{et} \quad Ecart(BS) = 1$$

4.5. Définition de la fonction *Ecart'* et de la fonction d'utilité *U'*

Cette fonction concerne le dimensionnement de l'atelier c'est-à-dire le nombre de machines les moins coûteuses à mettre dans chaque étage.

Nous définissons un dimensionnement le moins coûteux est celui qui comporte les machines qui coûtent le moins cher dans chaque étage dans notre cas il est égal à *min* (*Cout_{it}*) (la machine la moins coûteuse par étage). Le plus coûteux dimensionnement est celui qui comporte autant de machines que de jobs par étage donc *n* machines par étage et le coût total le plus élevé sera la somme des coûts de toutes les *n* machines par étage que nous pouvons prévoir. Plus la somme des coûts des machines dans les *k* étages est petite plus le dimensionnement obtenu est le moins coûteux. La fonction d'écart d'un dimensionnement par rapport au dimensionnement optimal est définie par :

$$Ecart' \left(\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} Y_{it} \right) = \frac{\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} Y_{it} - \sum_{t=1}^k \min_{i=1, \dots, M'_{max}} (Cout_{it})}{\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} - \sum_{t=1}^k \min_{i=1, \dots, M'_{max}} (Cout_{it})}$$

Propriété : $Ecart' \left(\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} Y_{it} \right) \in [0,1]$

L'utilité de dimensionnement est donc définie par :

$$U' : \mathbb{N} \rightarrow [0,1]$$

$$x \rightarrow 1 - Ecart'(x)$$

Donc :

$$U' \left(\sum_{t=1}^k \min_{i=1, \dots, M'_{max}} (Cout_{it}) \right) = 1$$

$$et \ Ecart' \left(\sum_{t=1}^k \min_{i=1, \dots, M'_{max}} (Cout_{it}) \right) = 0$$

Et

$$U' \left(\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} \right) = 0$$

$$et \ Ecart' \left(\sum_{i=1}^{M'_{max}} \sum_{t=1}^k Cout_{it} \right) = 1$$

5. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS

Le programme linéaire présenté ci-dessus a été implémenté en C++ et résolu par le solveur CPLEX 9.1. Les instances ont été générées aléatoirement. Nous avons testé des instances avec un nombre d'étages égal à 2, nombre de jobs types représentatifs des futurs demandes pour le flow shop hybride étudié variant de [5, 7, 8, 10]. Les temps opératoires prévisionnels ont été générés aléatoirement dans l'intervalle [3,14] unités de temps. Par ailleurs nous avons considéré que toutes les machines dans tous les étages ont le même coût.

Nous présentons dans ce tableau le nombre de contraintes et des variables pour chaque instance, λ , la fonction objectif obtenue et le temps de calcul CPU (en secondes).

Nbr d'étages	Nbr de jobs	Nbr de variables	Nbr de contraintes	λ	Objectif	CPU
2	5	373	550	0	0	0,305
				0,1	0,0372	69,0625
				0,5	0,1638	1042,47
				0,9	0,05	416,875
				1	0	0,461
2	7	913	1246	0	0	0,4424
				0,1	0,04217	41921,5
				0,5	0,14357	42071,3
				0,9	0,04167	9519,64
				1	0	10,6693
2	8	1315	1744	0	0	15,328
				0,1	0,14873	43200
				0,5	0,25058	43200
				0,9	0,07857	43200
				1	0	107,531
2	10	2443	3100	0	0	1,829
				0,1	0,04901	43200
				0,5	0,17071	43200
				0,9	0,03333	43200
				1	0	8400,03

Tableau 1. Résultats des expérimentations

Pour $\lambda = 0$ nous favorisons la minimisation du nombre de machines disponibles pour chaque étage et pour $\lambda = 1$ nous favorisons la minimisation de C_{max} .

Nous remarquons d'après le Tableau 1 que plus on s'approche d'un compromis entre la minimisation de C_{max} et la minimisation du coût du dimensionnement plus la valeur de l'objectif augmente pour atteindre un maximum qui correspond à $\lambda = 0,5$. Ceci montre qu'un compromis entre les deux objectifs détériora la fonction « objectif » globale que les valeurs extrêmes de λ (0 et 1).

Le temps de calcul devient plus élevé également quand on se rapproche de la valeur de $\lambda = 0,5$ (compromis des deux objectifs). Ce temps peut atteindre les 43 000 secondes. Pour certaines expérimentations nous étions obligés de limiter le temps de calcul afin de remédier aux problèmes de mémoire et d'obtenir des solutions.

Dans la figure suivante nous présentons un exemple d'évolution de la fonction objectif en fonction de différentes valeurs de λ (allant de 0 à 1 avec un pas égal à 0,1).

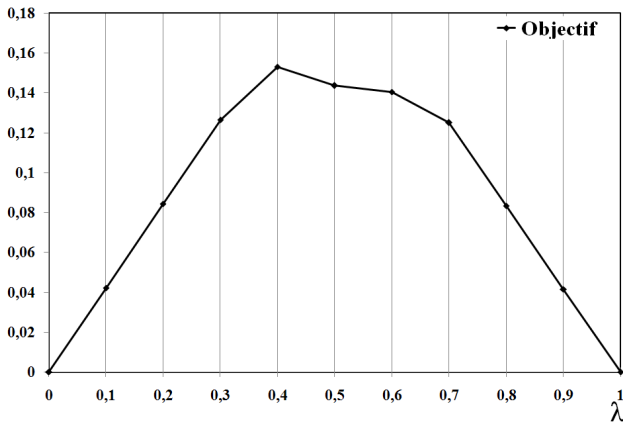


Figure 3. Evolution de l'objectif en fonction de λ

Les résultats présentés dans la figure 3 confirment le constat réalisé suite au tableau global des résultats sur l'impact de la valeur de λ sur la valeur de l'objectif obtenu.

La figure suivante montre que la fonction d'utilité de C_{max} croît en fonction des valeurs de λ . Ceci résulte de fait que plus λ augmente plus la priorité est donnée à la minimisation de C_{max} et donc il s'approche de BI . Inversement pour le nombre de machines total (dimensionnement) plus λ augmente plus le coût du dimensionnement de machines augmente et donc le coût du dimensionnement s'éloigne de sa valeur minimale.

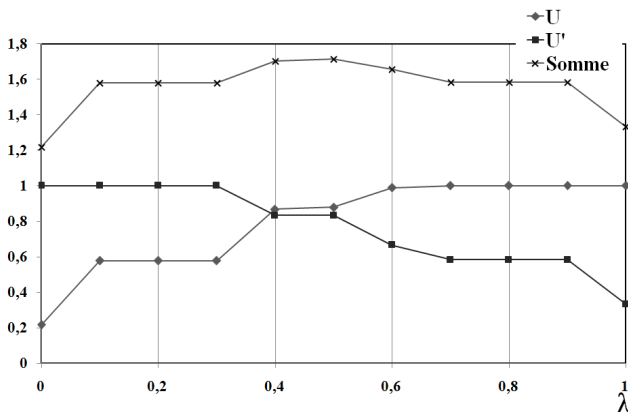


Figure 4. Evolution des fonctions d'utilité en fonction de λ

Nous avons défini des fonctions d'écart correspondantes aux écarts entre la valeur de C_{max} trouvée et la borne inférieure et entre le coût total de machines dans les étages et leur somme de coûts minimale. Nous pouvons alors associer un coût à ces écarts. En effet plus l'écart est élevé plus c'est coûteux. C'est-à-dire dans le cas de dimensionnement plus on s'éloigne du dimensionnement le moins coûteux (la machine la moins coûteuse par étage) plus on doit payer de l'argent et dans le cas de C_{max} plus on s'éloigne de la meilleure date d'achèvement (BI) plus ça coûte de l'argent. Donc le coût total d'une solution c'est la somme des coûts engendrés par les écarts de C_{max} et les coûts engendrés par les écarts du dimensionnement. En d'autres termes, les écarts

représentent l'évolution des coûts totaux d'une solution. Donc l'interprétation des courbes des écarts est associée à l'interprétation du coût total d'une solution.

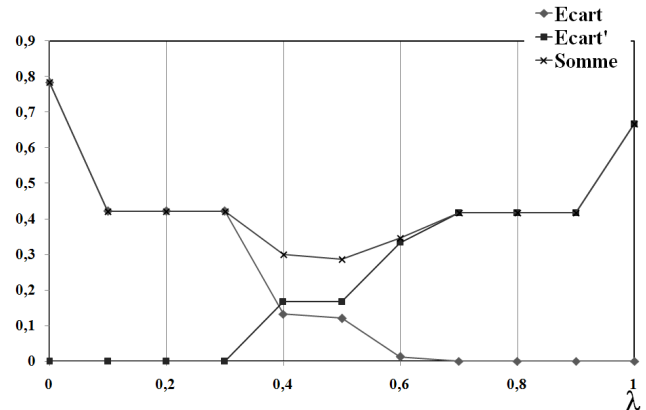


Figure 5. Evolution des écarts en fonction de λ

Nous remarquons que plus λ augmente plus l'écart de C_{max} par rapport à sa valeur minimale diminue et inversement pour le dimensionnement. L'écart global atteint sa valeur minimale aux valeurs de λ proches du compromis. Ceci nous montre que le compromis des deux objectifs minimise le coût global engendré par ce choix par rapport aux cas quand on favorise l'une ou l'autre des minimisations.

Au vu des résultats obtenus nous pouvons conclure que cette approche peut servir à obtenir une solution exacte à un problème d'ordonnancement et de dimensionnement d'un atelier organisé en flow shop hybride. Malheureusement le temps de calcul est important quand il s'agit de la recherche d'une solution de compromis.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux réalisés autour de la conception des ateliers se sont intéressés aux problèmes de dimensionnement. Nous avons remarqué l'absence de considération des problèmes d'ordonnancement dès la phase de conception. En effet, l'ordonnancement est considéré seulement en phase d'exploitation et le résultat de la conception fournira des données et imposera des contraintes à la réalisation de l'ordonnancement. Mais le dimensionnement et l'ordonnancement sont fortement liés.

Dans ce papier nous nous intéressons à la résolution de dimensionnement basé sur les ordonnancements de scénarios de production prévisionnels. Une approche de résolution du dimensionnement basée sur l'optimisation a été proposée. L'objectif étant de minimiser l'écart entre le Makespan et la date d'achèvement des travaux minimale d'une part et la minimisation de l'écart entre le coût total des machines dans chaque étage et le coût total minimal des machines.

Un poids λ a été associé à C_{max} . Plus λ est important plus la priorité est donnée à la minimisation de l'écart associé à C_{max} par rapport à celui associé au dimensionnement.

Les résultats ont montré que la solution de compromis entre les deux objectifs détériore la fonction « objectif » globale. Nous avons observé aussi que autour de cette zone de compromis (λ autour de 0,5) le temps de calcul augmente énormément par rapport aux situations extrêmes ($\lambda = 0$ et $\lambda = 1$).

Le coût associé aux différentes valeurs de λ a la même allure d'évolution que les courbes associées aux écarts. Au vu de ces résultats nous avons remarqué que le coût global atteint ses valeurs minimales autour des valeurs de compromis.

Cette approche peut servir à fournir une solution de départ au problème de dimensionnement et de l'ordonnement des problèmes de flow shop hybride à plusieurs étages. Malheureusement cette approche trouve ses limites pour deux principales raisons. La première c'est le temps de calcul important dès que nous essayons de chercher une solution de compromis. La deuxième, la plus importante, cette approche n'est pas générique elle s'intéresse à un type d'organisation (flow shop hybride). L'implémentation et le test d'une deuxième approche, qui est une variante de celle-ci, peut être envisageable où l'utilisateur est capable de borner un des deux critères et de minimiser l'autre.

En perspective nous travaillons sur une approche intégrant des techniques d'optimisation et de simulation dans le cadre d'une démarche méthodologique. Cette approche aura pour objectif de dimensionner un atelier de production en tenant compte de la performance des ordonnancements dès la phase de conception. Cette approche doit aboutir à un dimensionnement robuste par rapport à la variabilité des données et paramètres utilisés pour calculer les ordonnancements (type de production, nombre de jobs, temps opératoires, ...). Un intérêt sera porté sur l'aspect générique de cette approche.

REFERENCES

- Askin R.G. et C. R. Standridge, 1993. Modeling and Analysis of Manufacturing Systems, Wiley: New York.
- Aubry A., M. L. Espinouse, M. Jacomino et P. Mrozicki, 2005. Compromis entre robustesse et coût pour la configuration d'un parc de machines parallèles partiellement multifonctions. *MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC*, Rennes, pp. 331-338.
- Aubry A., M. L. Espinouse et M. Jacomino, 2006. Robust Load-Balanced Configuration With Fixed Costs For The Parallel Multi-Purpose Machines Problem. *International Conference Service Systems and Service Management*, pp. 990-995.
- Ching-Torng L., H. Chiu et P.-Y. Chu, 2006. Agility index in the supply chain. *International Journal of Production Economics*, Volume 100, Issue 2, p. 285-299.
- Choon H. N., 1991. Combining simulation with optimization search techniques for the design of flexible manufacturing systems. *In Proceedings of the International Conference on Computer Integrated Manufacturing*, Singapore, pp. 159-162.
- Czarneck, H., B. J. Schroer et M. M. Rahman, 1997. Using simulation to schedule manufacturing resources. *In Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Atlanta, GA, pp. 750-757.
- Dumbrava S., 1997. The design of flexible manufacturing systems using simulations. *Intelligent Manufacturing Systems*, pp. 151-155.
- Feyzioglu O., H. Pierreval et D. Delflandre, 2005. A simulation based optimization approach to size manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 43, N°2, pp. 247-266.
- Govil M. K. et M. C. Fu, 1999. Queueing theory in manufacturing : a survey. *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 214-240.
- Guinet A., M. M. Solomon, P. K. Kedia et A. Dussauchoy, 1996. A computational study of heuristics for two-stage flexible flowshops. *International Journal of Production Research*, 34, pp. 1399-1415.
- Korbaa O., 2003. Contribution à la conception et l'optimisation des systèmes de transport et de production. Habilitation à diriger des recherches.
- Law A. M. et W. D. Kelton, 2000. Simulation Modeling and Analysis, MacGraw-Hill: New York
- McHaney R. W. et D. E. Douglas, 1997. Multivariate regression metamodel: a DSS application in industry. *Decision Support Systems*, 19, pp. 43-52.
- Patel V., J. Ashby et J. Ma, 2002. Discrete event simulation in automotive final process system. *In proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference*, San Diego, CA, pp. 1030-1034.
- Pierreval H. et L. Tautou, 1997. Using evolutionary algorithms and simulation for the optimisation of manufacturing systems. *IIE Transactions*, 29, pp. 181-189.
- Proth J. et X. Xie, 1994. Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production, Masson : Paris.

- Riane F. 1998. Scheduling hybrid flow-shop : Algorithms and applications. Sciences de Gestion. Mons : Facultés Universitaires Catholiques de Mons, 150 p.
- Sharifi H. et Z. Zhang, 1999. A methodology for achieving agility in manufacturing organization An introduction, *International Journal of Production Economics* 62, pp. 7–22.
- Spieckermann S., H. Heinzl, S. Gutenschwager et S. Voß, 2000. Simulation-based optimization in the automotive industry – a case study on body shop design. *Simulation*, 75, pp. 276-286.
- Sutcliffe N., 1999. Leadership behavior and business process reengineering (BPR) outcomes: An empirical analysis of 30 BPR projects, *Information & Management* 36, pp. 273–286.
- Vignier A., Billaut, J.C., Proust, C. 1999. Les problèmes d'ordonnancement de type Flow-Shop Hybride : Etat de l'art. *R.A.I.R.O. – Recherche Opérationnelle*, vol 33, pp. 117-83.