

Publié par : Faculté des sciences de l'administration
Published by : Université Laval
Publicación de la : Québec (Québec) Canada G1K 7P4
Tél. Ph. Tel. : (418) 656-3644
Fax : (418) 656-7047

Édition électronique : Aline Guimont
Electronic publishing : Vice-décanat - Recherche et partenariats
Edición electrónica : Faculté des sciences de l'administration

Disponible sur Internet : http://rd.fsa.ulaval.ca/ctr_doc/default.asp
Available on Internet : rd@fsa.ulaval.ca
Disponible por Internet :

DOCUMENT DE TRAVAIL 2004-010

PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE MACHINE MULTITÂCHE : UNE APPLICATION DANS L'INDUSTRIE DE LA CHAUSSURE

Jacques RENAUD
Fayez F. BOCTOR
François BOUCHARD

Version originale : ISBN – 2-89524-200-3
Original manuscript :
Version original :

Série électronique mise à jour : 03-2004
On-line publication updated :
Seria electrónica, puesta al día

Planification de la production d'une machine multitâche : Une application dans l'industrie de la chaussure

Jacques Renaud^{1,2}, Fayez F. Boctor^{1,2} et François Bouchard²

¹Faculté des Sciences de l'administration, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4

²Centre de recherche sur les technologies de l'organisation réseau (CENTOR), Université Laval,
Québec, Canada G1K 7P4

Résumé

Dans cet article nous étudions un nouveau problème d'ordonnancement qui, au meilleur de nos connaissances, n'a jamais été abordé dans la littérature. Il s'agit du problème d'ordonnancement d'une machine à injection multitâche. Pour une machine multitâche, le réglage pour effectuer une nouvelle tâche entraîne l'arrêt complet de toutes les autres tâches en cours. L'approche proposée a été testée sur les données d'une année de production d'une entreprise de fabrication de chaussures de la région de Québec. Diverses simulations ont démontré l'efficacité des procédures développées et la parfaite faisabilité des solutions proposées. Un logiciel mettant en œuvre l'approche proposée a été développé et implanté en entreprise. Ce logiciel est actuellement utilisé pour la planification courante de la production.

Mots clés : Ordonnancement, planification de la production, heuristiques, machine multitâche

Abstract

This paper deals with a new scheduling problem which, to the best of our knowledge, has never been the subject of any previous publication. The paper deals with the scheduling of a number of tasks on a multi-task injection machine. The most important feature of our problem is that setting up the machine to do a new task requires stopping all the concurrent tasks. In this paper we propose a scheduling approach that has been tested and used to establish the operations schedule for a whole year for a major boot manufacturer in the Quebec City region. Obtained results and different simulations show the efficiency of the proposed approach and the feasibility of the produced schedules. We also produced a computer software that implements the proposed approach. This program is used by the manufacturer on a daily basis.

Key words: Scheduling, heuristics, multi-task machines

1. Introduction

Cet article présente un système de planification de la production développé pour un important fabricant de chaussures situé dans la région de Québec. Cette entreprise est une des plus grandes entreprises manufacturières de chaussures au Canada. Elle emploie actuellement plus de 360 employés et son chiffre d'affaire est supérieur à 10 millions de dollars annuellement. Reconnue internationalement, elle exporte une importante partie de sa production aux Etats-Unis où elle approvisionne plusieurs magasins à grande surface. Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur l'optimisation de la production d'une gamme particulière de produits, les bottes d'hiver. Nous avons développé un logiciel qui est présentement utilisé par l'entreprise pour planifier efficacement la production des bottes en fonction des dates de livraison promises et de la disponibilité des matières premières.

Quelque soit le modèle fabriqué, chaque botte se décompose en trois parties : une coquille monobloc (ou claque), une doublure et une hausse. La coquille est la partie de la botte qui soutient le pied, ses caractéristiques principales sont d'être robuste, imperméable et de résister à la perforation occasionnée par les torsions dues à la marche. La doublure qui assure le confort et la chaleur de la botte est faite de feutre de polyester. Finalement, la hausse est confectionnée de nylon hydrofuge. De ces trois parties, seule la hausse n'est pas fabriquée à l'usine. En effet, les hausses sont importées de Chine par bateau avec un délai de livraison de trois mois. Les feutres sont fabriqués à l'aide d'une machine de découpe automatique à contrôle numérique qui optimise les patrons de coupe. Douze postes de travail sont ensuite disponibles pour effectuer les coutures nécessaires. Les coquilles sont fabriqués à l'aide d'une machine à injection de caoutchouc possédant plusieurs bras (huit dans ce cas-ci) sur lesquels peuvent être installés des moules de diverses grandeurs. La coquille est elle-même composée de deux parties, la semelle et le contour qui peuvent être de couleurs différentes. Finalement, les trois composantes de la botte sont assemblées manuellement sur une ligne de montage disposant de 24 postes de travail.

En conditions d'opération normale, la capacité de production de la machine de découpe du feutre est de 300 feutres à l'heure, la capacité d'assemblage des bottes est d'environ de 1 000 paires à l'heure alors que l'injection se fait à un taux d'environ 60 paires de coquilles à l'heure. Le quart de travail de jour est de 9 heures et l'entreprise peut utiliser jusqu'à trois quarts de travail en période de pointe, l'usine fonctionne alors 24 heures par jour. La machine à injection constitue

clairement le goulot du système de production. Une bonne planification de l'utilisation de cette machine se traduit directement en un horaire de production plus efficace et plus apte à respecter les dates de livraison promises. Nous avons donc développé un système d'ordonnancement complet afin de planifier la fabrication des bottes sur la machine à injection.

La suite de cet article est organisée comme suit. La Section 2 définit précisément le contexte du problème. Suit une revue de la littérature sur les problèmes de production apparentés à la Section 3. L'approche de résolution est présentée en détail à la Section 4 et la Section 5 présente les résultats obtenus sur les commandes d'une année complète pour un modèle donné. Les conclusions de cette recherche terminent l'article.

2. Définition du problème

Nous allons débiter cette section en présentant les caractéristiques de la demande pour ensuite définir le fonctionnement de la machine à injection. Les commandes des clients sont reçues très longtemps à l'avance. Typiquement, en février et mars, près de 90% des commandes sont reçues avec des dates de livraison fixées en octobre et novembre. En avril, l'ensemble du carnet de commande est connu avec certitude. Chaque commande c_i ($i = 1, \dots, n$) possède une date de livraison d_i , un modèle m_i et une combinaison de couleurs k_i pour la coquille. À chaque commande c_i est associée des quantités à produire q_{ij} pour chacune des p pointures disponibles ($j = 1, \dots, p$). En pratique, en combinant les bottes pour enfants et pour adultes, la planification doit tenir compte d'un total de 22 pointures et de 13 combinaisons de couleurs possibles. Les pointures des modèles pour enfants vont de 5P à 13P alors que les pointures pour adultes vont de 1G à 13G. Les couleurs disponibles pour la semelle et le contour sont *Black*, *Clear*, *Fushia*, *Mauve*, *Navy*, *Red*, *State Blue* et *Violet*, la combinaison la plus populaire étant le *Black-Black*.

Les caractéristiques de la machine à injection sont les suivantes. La machine possède y bras pivotant autour d'un axe central, chaque bras pouvant produire l'une des p pointures. Une pointure ne peut être produite que sur un seul bras à la fois car il n'y a qu'un seul moule de disponible par pointure. Chaque changement de moule sur un bras demande un temps de réglage de s_1 minutes et chaque changement de couleur un réglage de s_2 minutes. Les deux opérations de réglage ne peuvent être effectuées simultanément et les temps sont cumulatifs car il y a un seul opérateur par machine. Notons qu'un changement de couleur affecte la couleur de tous les moules sur les y bras

de la machine. De plus, lors d'un changement de moule ou de couleur, la production de tous les bras de la machine est arrêtée, il s'agit d'une particularité importante et distinctive de la machine étudiée. Le temps de fabrication d'une paire est de t minutes, quelque soit le modèle, la couleur ou la peinture. La machine possède deux points d'injection, un pour la semelle, l'autre pour le contour. Le passage d'une commande de couleur Semelle-Rouge/Contour-Noir à Semelle-Noir/Contour-Rouge demande donc un changement de couleur aux deux points d'injection pour un temps total de $2s_2$ minutes. En pratique, la machine étudiée possède 8 bras, le temps de changement et de réglage d'un moule (s_1) est de 30 minutes et le temps de changement de couleur (s_2) est de 45 minutes. Compte tenue du temps de rotation de la machine, la cadence de production, qui est indépendante du modèle, de la peinture ou de la couleur, est de 55 paires de coquilles à l'heure pour l'ensemble des 8 bras. Cela signifie que pour un bras donné, la capacité est de 6,875 paires à l'heure ($55 \div 8$). La Figure 1 présente une vue schématique de la machine à injection utilisée, on y distingue clairement les 8 bras et les deux points d'injection.

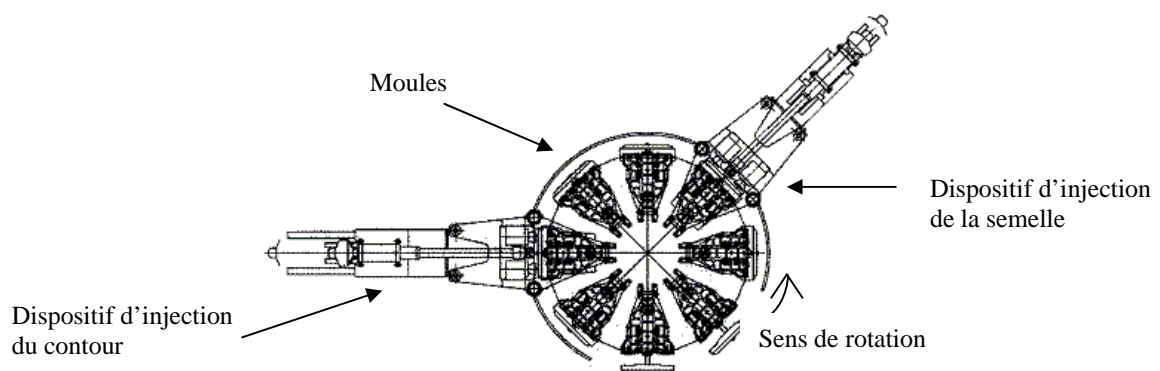


Figure 1. Vue schématique d'une machine à injection multi-points

Le problème consiste à définir un horaire de production pour l'ensemble des commandes c_i selon les quantités désirées q_{ij} et en respectant les dates de livraison promises et l'ensemble des contraintes opérationnelles. L'horaire de production doit mentionner quelles sont les couleurs, peintures et quantités qui seront fabriquées en tout temps, sur chaque bras de la machine, ainsi que les temps précis des divers changements de production et les temps de réglage associés. En cas de retard appréhendé, il faut déterminer à quel moment un quart de travail supplémentaire doit être ajouté et quand il peut être éliminé. L'entreprise où cette étude s'est déroulée définit l'objectif en matière de planification des opérations de la façon suivante : trouver l'horaire de production

réalisable permettant de terminer la production de toutes les commandes le plus tôt possible (minimisation du temps de passage des commandes). D'autres objectifs tels que la minimisation des coûts de stockages sont également envisageables. Dans la suite, nous adoptons le même objectif que l'entreprise.

3. Revue de la littérature

Il existe très peu de recherches sur la planification de la production dans l'industrie de la chaussure. Des deux articles recensés, aucun ne s'attarde à la planification de la production proprement dite. Hsing (1999) effectuent une analyse économique du réseau logistique de l'industrie Japonaise de la chaussure composée des producteurs indépendants, des fournisseurs, des sous contractants et des vendeurs. Kim *et al.* (2002) proposent l'utilisation d'agents pour simuler le processus d'approvisionnement et de négociation dans l'industrie de la chaussure. Des résultats de simulations pour une entreprise sont rapportés.

De plus, au meilleur de nos connaissances, il n'existe aucune publication qui porte sur l'ordonnancement d'une machine multitâche telle que la machine d'injection étudiée ici. Notons cependant que si les temps de changement pour les moules et les couleurs étaient de zéro ($s_1 = s_2 = 0$), que si les dates de livraison étaient suffisamment tardives et que toutes les commandes étaient de même couleur, ce problème d'ordonnancement des commandes se réduirait alors à un problème d'ordonnancement de machines parallèles ($P//C_{\max}$ selon la notation de Lawler *et al.* 1993) qui est un problème NP-Dur (Lenstra et Rinnooy Kan, 1978 ; Garey et Johnson, 1979). Le problème que nous étudions avec d'importants temps de réglage, la nécessité d'arrêter tous les bras de la machine lors d'un réglage, des dates de livraison et des couleurs étant une généralisation du problème d'ordonnancement sur des machines parallèles, il est donc également NP-Dur.

Allahverdi *et al.* (1999) présentent une revue de la littérature et une classification des problèmes d'ordonnancement incorporant des temps de réglages. Selon la classification proposée, les réglages du problème étudié peuvent être catégorisés comme étant des réglages de groupe dépendant de la séquence de production (*sequence-dependent batch setup time* – $ST_{sd,b}$). La classification du problème étudié est donc $P/ST_{sd,b}/C_{\max}$. Selon Allahverdi *et al.* (1999), seuls Bitran et Gilbert (1990) et Ghosh (1994) ont travaillé sur des problèmes avec réglages de groupe

dépendant de la séquence mais aucun n'a abordé le problème de la minimisation du temps de passage. Bitran et Gilbert (1990) ont travaillé sur un problème avec des réglages de deux ordres de grandeurs afin de minimiser le coût total de réglage ($P/SC_{sd,b}/TSC$). Ghosh (1994) a étudié deux problèmes particuliers de minimisation du temps de traitement ($P/ST_{sd,b}/TCT$ et $P/ST_{sd,b}/WTCT$) où les temps de réglage satisfont l'inégalité du triangle. Dans les deux cas les auteurs ont traité de machines parallèles ce qui est très différent du problème étudié ici où tous les bras de la machine sont totalement immobilisés lors d'un réglage.

La littérature sur le problème classique d'ordonnement des machines parallèles est très abondante et il ne serait pas pertinent ici d'en faire une couverture exhaustive. Le lecteur intéressé pourra consulter les revues de la littérature de Cheng et Sin (1990) et de Mokotoff (2001). Notons cependant quelques travaux fondamentaux sur lesquels se basent certaines procédures développées plus loin dont l'algorithme du temps d'opération le plus long (Graham, 1969). Coffman *et al.* (1978) ont proposé l'algorithme itératif *MultiFit* qui malgré sa simplicité demeure toujours un des meilleurs algorithmes disponibles actuellement (voir à cet effet la récente étude empirique de Mokotoff *et al.*, 2001). Au niveau optimal, notons l'algorithme basé sur la génération d'inégalités valides de Mokotoff (2003) qui permet de résoudre des problèmes ayant jusqu'à 100 machines et 1 000 commandes.

Dans la littérature scientifique, le problème des machines parallèles avec un serveur unique (*parallel machine problem with a single server*) est celui qui se rapproche le plus du problème étudié. Ce problème est une généralisation du problème des machines parallèles classique où un réglage doit être effectué avant de charger une commande sur une machine. Ce réglage doit être réalisé par un serveur qui ne peut effectuer qu'un réglage à la fois (Hall *et al.* 2000, Brucker *et al.* 2002). Il est donc probable qu'une ou plusieurs machines se retrouvent inactives alors que dans notre problème, le réglage d'un bras (machine) entraîne l'arrêt automatique de tous les autres bras (machines).

4. Approche de résolution

Il importe dans un premier temps de présenter quelques facteurs contextuels qui ont influencé le développement de l'approche de résolution. La distribution de la demande pour les différentes peintures est très variée. La demande pour les petites et les grandes peintures est relativement

faible comparativement aux pointures *moyennes* dont la demande peut être jusqu'à dix fois plus élevée. Comme il est impossible de remplir tous les bras de la machine uniquement avec des pointures à haut volume, le choix des pointures à fabriquer ensemble est primordiale. Il est à noter que certains bras peuvent *tourner à vide*, c'est-à-dire qu'aucune injection n'a lieu. La demande est également très variable en fonction de la combinaison de couleur (semelle et contour), la plus populaire étant le noir-noir. Encore une fois, la demande des coquilles noir-noir peut représenter dix fois la demande de coquilles noir-rouge ou encore mauve-mauve. La méthode développée tente de tirer profit de ces caractéristiques. Dans les sections qui suivent nous présentons d'abord les grandes lignes de la méthode puis détaillons chacune de ses étapes.

4.1 Présentation générale

Afin de réduire la complexité du problème, la méthode commence par créer des *groupes de commandes* ayant des caractéristiques similaires. Cela permet de tirer profit du fait que plusieurs commandes différentes peuvent correspondre à des produits similaires. En effet, plusieurs clients différents peuvent, par exemple, avoir passé des commandes pour des bottes avec des coquilles noir-noir de pointure 13P. La méthode détermine ensuite ce que nous appelons des *blocs de production*, c'est-à-dire des ensembles de groupes de commandes de même couleur. Suit après la phase d'*ordonnancement* qui permet de préparer le calendrier de production détaillé.

4.2 Création de groupe de commandes

Pour débiter, les n commandes c_i sont fusionnées en u commandes groupées cg_z ($z = 1, \dots, u$). Toutes les commandes possédant la même couleur et la même date d'échéance sont regroupées en une commande groupée. À chaque commande groupée cg_z est donc associée une combinaison de couleur kg_z et une date de livraison dg_z identique à la combinaison de couleur et à la date des commandes qui la compose. À chaque commande groupée cg_z est également associé des quantités à produire qg_{zj} pour chacune des p pointures disponibles ($j = 1, \dots, p$) correspondant à la somme des quantités à produire q_{ij} des commandes qui la compose. Un ordonnancement préliminaire est alors effectué pour connaître le temps de production de chaque commande groupée à l'aide de la méthode d'ordonnancement qui sera présentée plus loin. Après cet ordonnancement, nous avons toutes les informations pour programmer les commandes groupées en ordre croissant de la date d'échéance puis, en cas d'égalité, en ordre croissant du temps de production. L'utilisation de ces

critères est guidée par l'objectif de minimiser les retards et de réduire les temps de passage dans l'atelier.

Si une commande groupée est en retard, des quarts de travail supplémentaires sont ajoutés à rebours à partir de la date d'échéance de la commande groupée jusqu'à ce que le nombre de quarts de travail ajouté permette d'éliminer le retard. Cette étape est effectuée en considérant seulement les jours ouvrables ainsi que les dates auxquelles la direction accepte d'ajouter des quarts de travail.

Après cette étape nous obtenons un premier calendrier de production complet. L'étape qui suit, la formation de blocs de production, permet d'améliorer cette solution initiale en fusionnant certaines commandes groupées afin de réduire les réglages dus aux changements de couleurs et de moules.

4.3 Formation des blocs de production

À cette étape, les u commandes groupées sont combinées entre elles pour former e bloc de production b_h ($h = 1, \dots, e$). Les commandes groupées qui possèdent des dates d'échéances différentes, mais la même couleur, sont combinées en bloc de production lorsque cela n'entraîne aucun nouveau retard. La production de ces commandes groupées en un seul bloc permet d'économiser de nombreux réglages de couleur et de moule. À chaque bloc b_h est associé une couleur kb_h et une date de livraison db_h égale à la date la plus tôt parmi les dates des commandes groupées qui le compose. À chaque bloc b_h est également associé des quantités à produire qb_{hj} pour chacune des p peintures ($j = 1, \dots, p$) correspondant à la somme des quantités à produire qg_{zj} des commandes groupées qui le composent.

Pour former les blocs de production nous procédons comme suit. La première commande groupée du calendrier de production est utilisée pour créer le premier bloc de production ($b_1 = cg_1$). Les commandes groupées du calendrier sont ensuite examinées successivement pour soit être ajoutée à un bloc existant, soit pour former un nouveau bloc. Ainsi, pour chaque commande groupée cg_z , ($z = 2, \dots, u$) trouver le dernier bloc de production h ayant la même couleur. S'il n'y a pas de bloc de même couleur, créer un nouveau bloc comprenant uniquement la commande groupée cg_z et le placer à la fin de la liste des blocs de production. S'il existe un bloc

b_h de même couleur, additionner temporairement les quantités à produire pour cg_z au bloc b_h . Évaluer la durée de production de ce bloc et la somme des retards potentiellement occasionnés pour ce bloc et tous les blocs qui suivent, notons ce retard r_1 . Notons que lors de la création d'un nouveau bloc, il est important de refaire son ordonnancement au complet puisque le temps total de production du bloc augmenté peut être inférieur à la somme des temps de production du bloc et de la commande groupée qui le composent. Cela est due aux gains éventuels sur les réglages. Si aucun retard n'est créé ($r_1 = 0$), augmenter le bloc b_h en y ajoutant la commande groupée cg_z .

Si un retard est créé ($r_1 > 0$), évaluer le retard r_2 qui serait créé si la commande groupée cg_z était placée seule comme un bloc distinct à la fin de la liste des blocs de production. Si aucun retard n'est alors créé ($r_2 = 0$), créer un bloc comprenant uniquement la commande groupée cg_z et le placer à la fin de la liste des blocs de production. Si le nouveau bloc crée un retard $r_2 > 0$, un retard est maintenant inévitable. Dans ce cas, les retards r_1 et r_2 sont comparés entre eux comme suit. On détermine comment ces retards pourraient être éliminés par l'ajout de capacité supplémentaire, c'est-à-dire par l'ajout d'un quart de travail de plus. Pour le retard r_1 créé dans le cas de l'ajout de cg_z au bloc b_h , calculer la date de début d'un quart de travail additionnel qui permettrait d'éviter ce retard. Déterminer également la date de début d'un quart de travail additionnel pour éliminer le retard r_2 . Choisir l'option qui nécessite l'ajout d'un quart de travail le plus tard.

La Figure 2 illustre, de façon très simplifiée, la formation de blocs de production à partir d'un ensemble de 7 commandes groupées. Supposons que nous sommes le 1^{er} septembre et afin de simplifier la présentation des temps de production, nous ne prenons pas en compte les fins de semaines. Dans cet exemple, chaque paire de lettres (N=Noir, B=Bleu, M=Mauve) représente une combinaison de couleur semelle/contour qui constitue une coquille. Il y a donc 4 combinaisons de couleurs différentes (NN, NB, MM, et BB). Pour chaque commande nous avons la date d'échéance et la durée de production en jours incluant les temps de réglage. Chaque étape présente l'information sur les commandes restantes à traiter et sur les blocs de production formés. À la première étape, la méthode crée le premier bloc 1-NN à partir de la commande 1-NN. À l'étape 2, comme aucun bloc de couleur NB n'existe, la commande 2-NB est transformée en un bloc équivalent 2-NB. La même opération est effectuée à l'étape 3 pour la commande 3-MM transformée en bloc 3-MM. L'étape 4 offre la première possibilité de regrouper la commande 4-

NN avec le bloc 1-NN. Après avoir effectué un nouvel ordonnancement on constate qu'il est possible de produire ensemble le bloc 1-NN et la commande 4-NN en 11,5 jours au lieu de 12. Une partie de ce gain est attribuable à une réduction de deux réglages de couleurs puisque la commande 4-NN ne suivra plus la commande 3-MM ce qui évite deux changements de couleurs. Dans ce cas-ci le regroupement est possible puisqu'il n'engendre aucun retard sur les blocs 2-NB et 3-MM qui peuvent être décalés. À l'étape 4, le nouveau bloc 1-NN ayant une durée de 11,5 jours est donc le résultat de la fusion de la commande 1-NN et de la commande 4-NN. L'étape 5 transforme simplement la commande 5-BB en un bloc 4-BB. L'étape 6 est particulière puisque la commande groupée 6-NB qui demande 4 journées de travail pourrait venir rejoindre le bloc 2-NB qui durerait alors 8,5 jours et se terminerait à temps. Par contre, puisque cela occasionnerait un retard sur le bloc 3-MM, la commande groupée 6-NB est simplement placée à la fin de la séquence des blocs en 5-NB. À l'étape 7, la commande 7-MM vient rejoindre le bloc 3-MM repoussant les blocs 4-BB et 5-NB sans créer de retard.

Utilisation maximale de la capacité des bras

Une fois la séquence des blocs de production fixée, la charge de travail de chacun des bras est évaluée en faisant un ordonnancement complet des tâches. Cette charge peut être très inégale d'un bras à l'autre à cause de disparités importantes entre la demande des différentes pointures. Comme la machine, donc l'ensemble des bras, doit tourner jusqu'à ce que le bras le plus chargé ait terminé sa production, les autres moules peuvent être sous utilisés affectant ainsi la productivité de la machine. Nous regardons donc s'il est possible de devancer la production complète ou partielle de certaines pointures appartenant à des blocs ultérieurs et ayant les mêmes couleurs. Pour chaque bras, à l'exception du bras ayant la plus grande charge, il faut évaluer la quantité pouvant y être ajoutée sans que cela n'allonge la durée du bloc (qui est égale à la durée du bras le plus chargé). Pour chacune des pointures fabriquées sur un bras, il faut vérifier s'il existe une quantité à produire de cette pointure dans les prochains blocs de même couleur et déplacer cette quantité dans le bloc à l'étude sans allonger la durée de production du bloc. Finalement, pour chacun des blocs dont des quantités ont été soustraites, il faut refaire l'ordonnancement.

Étapes 1	Commandes	1-NN	2-NB	3-MM	4-NN	5-BB	6-NB	7-MM
	Échéance	15 sept.	20 sept.	21 sept.	25 sept.	26 sept.	27 sept.	30 sept.
	Durée	8	5	2	4	1	4	2
	Blocs	1-NN						
	Échéance	15 sept.						
	Durée	8						
	Date fin	8 sept.						
2	Commandes		2-NB	3-MM	4-NN	5-BB	6-NB	7-MM
	Échéance		20 sept.	21 sept.	25 sept.	26 sept.	27 sept.	30 sept.
	Durée		5	2	4	1	4	2
	Blocs	1-NN	2-NB					
	Échéance	15 sept.	20 sept.					
	Durée	8	5					
	Date fin	8 sept.	13 sept.					
3	Commandes			3-MM	4-NN	5-BB	6-NB	7-MM
	Échéance			21 sept.	25 sept.	26 sept.	27 sept.	30 sept.
	Durée			2	4	1	4	2
	Blocs	1-NN	2-NB	3-MM				
	Échéance	15 sept.	20 sept.	20 sept.				
	Durée	8	5	2				
	Date fin	8 sept.	13 sept.	15 sept.				
4	Commandes				4-NN	5-BB	6-NB	7-MM
	Échéance				25 sept.	26 sept.	27 sept.	30 sept.
	Durée				4	1	4	2
	Blocs	1-NN	2-NB	3-MM				
	Échéance	15 sept.	20 sept.	21 sept.				
	Durée	11,5	5	2				
	Date fin	11,5 sept.	16,5 sept.	18,5 sept.				
5	Commandes					5-BB	6-NB	7-MM
	Échéance					26 sept.	27 sept.	30 sept.
	Durée					1	4	2
	Blocs	1-NN	2-NB	3-MM	4-BB			
	Échéance	15 sept.	20 sept.	21 sept.	26 sept.			
	Durée	11,5	5	2	1			
	Date fin	11,5 sept.	16,5 sept.	18,5 sept.	19,5 sept.			
6	Commandes						6-NB	7-MM
	Échéance						27 sept.	30 sept.
	Durée						4	2
	Blocs	1-NN	2-NB	3-MM	4-BB	5-NB		
	Échéance	15 sept.	20 sept.	21 sept.	26 sept.	27 sept.		
	Durée	11,5	5	2	1	4		
	Date fin	11,5 sept.	16,5 sept.	18,5 sept.	19,5 sept.	23,5		
7	Commandes							7-MM
	Échéance							30 sept.
	Durée							2
	Blocs	1-NN	2-NB	3-MM	4-BB	5-NB		
	Échéance	15 sept.	20 sept.	21 sept.	26 sept.	27 sept.		
	Durée	11,5	5	3,5	1	4		
	Date fin	11,5 sept.	16,5 sept.	20 sept.	21 sept.	25 sept.		

Figure 2

Illustration de la procédure de formation de blocs de production à partir des commandes groupées

4.4 Méthode d'ordonnement des blocs de production

Tel que mentionné précédemment, à chaque bloc de production b_h est associé des quantités à produire qb_{hj} pour chacune des p pointures disponibles. Notons qu'il est possible qu'il y ait aucune demande pour certaines pointures, $qb_{hj} = 0$, ce qui fait que le nombre de pointure à produire pour un bloc peut être inférieur à p . Pour un bloc donné, l'étape d'ordonnement consiste donc à trouver la séquence de production sur l'ensemble des bras de la machine permettant de minimiser le temps de production total.

Tel que mentionné à la Section 3, il n'existe, au meilleur de nos connaissances, aucune littérature permettant de planifier la production de ce type de machine multitâche. Par contre, il est possible de tracer certaines analogies entre ce problème et celui des machines parallèles puisque chaque bras peut être considéré comme une machine en parallèle en ajoutant la contrainte que dès qu'un bras (machine) est arrêté pour un réglage, tous les autres bras (machines) doivent également être arrêtés. Nous avons donc adaptés deux algorithmes développés pour les machines parallèles et pour lesquels des bornes sur la déviation maximale existent (Garey et al., 1978). Ces sont l'*algorithme du temps d'opération le plus long* (Graham, 1969) et l'heuristique *MultiFit* (Coffman et al., 1978).

Notre adaptation de l'*algorithme du temps d'opération le plus long* (OPL) commence par trier les pointures en ordre décroissant du temps de production. Comme la vitesse de production est la même pour toutes les pointures, nous pouvons trier selon les quantités à produire. Selon l'ordre de priorité ainsi établi, les quantités sont affectées au premier bras libre. À chaque fois qu'un bras se voit affecté une pointure nécessitant un changement de moule, un temps de réglage de s_1 minutes est ajouté au temps de chaque bras.

Notre adaptation de l'heuristique *MultiFit* part de la solution obtenue par l'*algorithme du temps d'opération le plus long* et tente d'en réduire la durée de façon itérative. Notons D^* la durée de la meilleure solution obtenue, D la durée de la dernière solution obtenue et C la durée cible. Cette adaptation fonctionne comme suit :

1. Trouver une solution initiale à l'aide de l'algorithme OPL. Soit D la durée totale de production. Mettre $D^* = C = D$ et sauvegarder l'ordonnement correspondant.
2. Réduire la durée C d'une heure. Considérer toutes les pointures comme non assignées.

3. Parmi les pointures non assignées, prendre la pointure dont le temps de production est le plus long et l'affecter au premier bras pouvant en terminer la production avant la durée cible C , aller à 4. Si aucun bras ne peut terminer la production avant C , l'algorithme arrête, aller à 5.
4. S'il reste encore des pointures non assignées, retour à l'étape 3. Si toutes les pointures ont été assignées, une meilleure solution a été trouvée. La durée de production D de cette solution est mise égale à la durée de production du bras le plus long. Mettre $D^* = D$ et retourner à 2.
5. Aucune amélioration ne peut plus être apportée, la meilleure solution est D^* .

Pour établir le calendrier de production d'un bloc, les deux méthodes d'ordonnement décrites ne prennent pas en considération les moules en place à la fin du bloc précédent. Cependant, il est évident qu'en le faisant, nous pouvons obtenir de meilleures solutions. Nous avons donc développé deux autres procédures pour prendre explicitement en considération les moules en place. Ces procédures sont présentées à la section suivante.

Prise en considération des moules en place

La première procédure conserve tous les moules en place et leur affecte directement la quantité à produire si une telle quantité existe. Les pointures restantes sont simplement planifiées selon l'algorithme OPL.

Selon la deuxième procédure, seuls les moules en place correspondant aux y pointures ayant les plus grandes quantités à produire sont maintenus et les pointures correspondantes sont alors automatiquement affectées. La valeur du paramètre y doit être fixée par l'utilisateur. Ensuite, les pointures restantes sont planifiées selon l'algorithme OPL.

L'approche que nous proposons utilise ces quatre procédures séparément et adopte, parmi les quatre solutions obtenues, celle permettant d'obtenir le temps de production le plus court.

5. Implantation de l'approche et résultats obtenus

L'approche proposée a été développée en Microsoft Visual Basic 6.0. Le logiciel développé permet la gestion des commandes clients ainsi que la mise à jour des quantités produites. Lorsque

les quantités produites diffèrent des quantités planifiées (interruption imprévue de la production, bris d'un moule, ...), un nouvel horaire de production est simplement généré. Puisque dans l'environnement de production étudié, chaque machine est dédiée à la fabrication d'un modèle particulier, le logiciel génère les solutions par modèle. La Figure 3 présente l'interface développée pour la gestion des commandes clients.

Le logiciel peut également être configuré pour tenir compte des caractéristiques de la machine comme le nombre de bras, la cadence de production en nombre de paires par heure et les moules en place lors de l'élaboration de l'horaire de production. Les informations sur la date de réalisation de l'horaire ainsi que sur le nombre de quarts de travail actuellement utilisés doivent également être entrées. Les résultats peuvent être affichés à l'écran ou envoyés vers des fichiers textes. Le logiciel permet également de simuler l'impact de l'ajout d'un quart de travail à une date donnée.

	Active ?	No commande	Client	Arrivée hausse	Échéance	Couleur	Modèle
1	1	400589	JRTH AMERICAIN SHC	07-30-02		BLACK-BLACK	AVENGER
2	1	400621	WALL MART	08-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
3	1	4005417	BLAIN	08-14-02		BLACK-BLACK	AVENGER
4	1	4005418	BLAIN	08-14-02		BLACK-BLACK	AVENGER
5	1	400681	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
6	1	400686	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
7	1	400687	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
8	1	400689	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
9	1	4006815	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
10	1	4006816	MILLS	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
11	1	400738	HART	09-01-02		BLACK-BLACK	AVENGER
12	1	400764	JRTH AMERICAIN SHC	09-05-02		BLACK-BLACK	AVENGER
13	1	400673	SAAN	09-09-02		BLACK-BLACK	AVENGER
14	1	400781	RED APPLE	09-09-02		BLACK-BLACK	AVENGER
15	1	400741	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER
16	1	400742	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER
17	1	400743	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER
18	1	400744	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER
19	1	400745	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER
20	1	400746	JRTH AMERICAIN SHC	09-15-02		BLACK-BLACK	AVENGER

Activer modèle: ASTRO / AVENGER | Désactiver tout

Saisir les modifications: []

Quelle ligne voulez-vous supprimer? []

Ajouter | Enregistrer | Supprimer | Regrouper | Quitter

Figure 3. L'interface des commandes

Le logiciel développé a été testé à l'aide des données réelles concernant la production d'un modèle, le modèle *Avenger* qui est une botte d'hiver populaire, pour lequel 60 commandes ont été reçues. Ainsi, la Figure 3 montre la commande 400621 passée par Wall Mart. À l'aide de la barre horizontale de défilement, il serait possible de voir que le contenu de cette commande est de 2 106 paires pour chacune des pointures 7G et 8G, de 1 404 paires pour les pointures 9G et 10G ainsi que de 702 paires pour les pointures 11G et 12G. À ces 60 commandes correspondent 10

combinaisons de couleurs différentes, 11 dates d'échéances et 22 pointures. Pour réaliser l'ensemble des commandes de ce modèle, l'entreprise a dédié une machine à temps plein de mars à novembre 2002. La machine utilisée possède 8 bras et une cadence de production de 55 paires à l'heure. Les temps de réglage sont de 30 minutes pour chaque changement de moule ($s_1 = 30$) et de 45 minutes pour chaque changement de couleur ($s_2 = 45$). La production a débutée le 1^{er} mars 2002 avec un seul quart de travail de 9 heures par jour.

Afin d'évaluer chacun des éléments constituant la méthode de résolution et leurs contributions à la performance du logiciel, quatre simulations ont été réalisées. Voici le détail des éléments de la méthode utilisée lors de ces simulations.

Simulation 1 : Lors de cette simulation nous avons utilisé la procédure de regroupement des commandes ainsi que la procédure d'ordonnancement *MultiFit*. À l'intérieur de cette simulation, chaque commande groupée correspond donc à un bloc.

Simulation 2 : Identique à la simulation 1 excepté que nous utilisons la procédure de formation de blocs de production présentée à la section 4, mais sans la méthode qui vise l'utilisation maximale de la capacité des bras.

Simulation 3 : Cette simulation utilise les mêmes procédures que la simulation 2 mais l'étape d'ordonnancement est améliorée en ajoutant à la méthode *MultiFit* les deux procédures qui prennent en considération les moules en place.

La simulation 3 est celle qui se rapproche le plus du mode de fonctionnement actuel de l'entreprise. En effet, après avoir placé les commandes en ordre de date de livraison, un travail manuel de regroupement selon les couleurs est effectué. Par la suite, le placement manuel des moules est *optimisé* par le responsable de la planification qui cherche intuitivement à minimiser les changements de moules.

Simulation 4 : Cette simulation ajoute à la précédente en incorporant la procédure pour l'utilisation maximale de la capacité des bras. La production de certaines quantités sera donc devancée afin de maximiser l'utilisation des bras. Actuellement cette politique n'est pas utilisée par l'entreprise puisqu'elle complexifie la planification.

Pour chacune des simulations, nous avons calculé le nombre de blocs de production obtenu et la date de fin ainsi que les mesures de performances suivantes : nombre de jours ouvrable pour réaliser la production, nombre de blocs en retard, le nombre de commandes en retard, le nombre total de jours de retard ainsi que le retard maximal obtenu (en jours ouvrable). Ces résultats sont présentés au Tableau 1.

Tableau 1. Résultats des simulations

	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4
Nombre de blocs	25	15	15	15
Date de fin de la production	13 novembre	5 novembre	1 novembre	7 octobre
Nombre de jours ouvrables	184	178	176	157
Nombre de blocs en retard	5	4	3	0
Nombre de commandes en retard	10	8	7	0
Nombre de jours de retard	104	44	29	0
Retard maximal	10	10	8	0

Le Tableau 1 démontre clairement l'efficacité des diverses procédures développées. Le simple ordonnancement des commandes selon leur date d'échéance demande 184 jours ouvrables de production. La procédure de formation des blocs (simulation 2) permet un gain de 6 jours ouvrables, gain obtenu principalement grâce à la réduction des changements de couleurs. Un total de 4 blocs sont en retard respectivement de 2, 10, 6 et 4 jours ouvrables. Comme ces blocs renferment respectivement 1, 2, 1 et 4 commandes, le total de journées de retard est de 44 ($2 \times 1 + 10 \times 2 + 6 \times 1 + 4 \times 4$). La procédure d'ajustement en fonction des moules en place (simulation 3) procure des améliorations plus faibles mais non négligeable. Malgré un gain de seulement 2 journées ouvrables, on note cependant que le nombre de jours de retard diminue de 44 à 29.

Les simulations 2 et 3 sont un bon reflet du mode de planification actuel de l'entreprise. D'ailleurs, l'entreprise a terminé la production de ces commandes au milieu novembre ce qui correspond à quelques jours près aux résultats de la simulation 3. Il est cependant difficile de comparer concrètement les résultats du logiciel avec les horaires produits par l'entreprise car nous n'avons pas pu obtenir l'information précise relative aux arrêts de la machine (retard ou absence des employés, bris des moules, ...). Par contre, comme il y a eu peu d'imprévus durant la période de production, à moins d'une dizaine de jours près, les résultats de la simulation 3 semblent conformes à la production de l'entreprise. Les horaires générés par le logiciel ont été présentés au directeur de la production de l'entreprise qui les a validés tout en attestant de leur faisabilité et de leur qualité.

La simulation 4, qui permet l'utilisation maximale de la capacité des bras, procure des résultats très intéressants. En effet, l'utilisation des bras à leur pleine capacité permet de réduire le nombre de jours de production de 176 à 157 et élimine tous les retards. Cela est dû au fait que cette procédure permet de produire rapidement des petites commandes associées à des pointures ou des couleurs moins populaires. Il y a donc un gain net sur le temps de production par une meilleure utilisation des moules lorsqu'ils sont chargés sur la machine. De plus, bien que le nombre de blocs initial soit toujours de 15, trois ont pu être réalisés conjointement avec d'autres blocs ce qui a également permis de sauver 3 séries de réglages.

Le Tableau 2 présente en détail une partie de l'horaire de production obtenu pour trois blocs de couleurs afin d'en apprécier la complexité. Le bloc 7, non montré sur la figure était associé à la couleur *Black-Violet* et les moules en place étaient respectivement les 12P, 1G, 3G, 11P, 4G, 13P3G et 2G ce qui explique un réglage de couleur de 0,75 heure et 6 réglages de moules pour 3 heures. Comme la machine produit 55 paires à l'heure, cela signifie que chaque bras fabrique en moyenne 6,875 paires à l'heure d'où un temps de production de 80,43 heures ($553/6,875$). Puisqu'un seul quart par jour est utilisé ici, la production du bloc 8 dure 9,35 quarts ou l'équivalent de 9,35 journées. La production du bloc 9 demande seulement un changement de couleur. On peut remarquer que les bras 6 et 8 de la machine sont toujours inactifs. La production du bloc 10 est plus intéressante. Elle demande deux changements de moules pour lancer la production et un changement de moule en cours de production sur le bras 5 après la production des 370 paires de grandeur 10P. Le temps total de production correspond à la charge du bras le plus

long soit 540 paires (ou encore 370+170) ce qui demande 78,54 heures. Un total de 8,97 journées seront nécessaires pour produire ces quantités. Cet exemple illustre également l'ordre de grandeur entre les couleurs les plus en demande comme le *Black-Black* et les moins populaires comme le *Black-Red*.

Tableau 2. Ordonnement des quantités sur les bras de la machine

Couleur	Bloc 8 <i>Black-Fushia</i>	Bloc 9 <i>Black-Red</i>	Bloc 10 <i>Black-Black</i>
Bras 1	5P : 553	5P : 74	5P : 400
Bras 2	7P : 553	7P : 74	3G : 540
Bras 3	8P : 553	8P : 74	8P : 400
Bras 4	9P : 553	9P : 74	9P : 393
Bras 5	10P : 553	10P : 74	10P : 370 + 12P : 170
Bras 6	13P : <i>Inactif</i>	13P : <i>Inactif</i>	1G : 516
Bras 7	6P : 553	6P : 74	6P : 400
Bras 8	2G : <i>Inactif</i>	2G : <i>Inactif</i>	2G : 540
Réglage couleur	0,75 heure	0,75 heure	0,75
Réglage moules	3,00 heures	0,00 heure	1,5 heures
Temps production	80,43 heures	10,76 heures	78,54 heures
Nombre de quarts	9,35 quarts	1,28 quart	8,97 quarts

5. Conclusion

Nous avons proposé une méthode heuristique pour résoudre le problème d'ordonnement des opérations d'une machine multitâche. Étant donné l'importance des temps de réglage, l'approche développée cherche à réduire les temps de mise en route associés aux changements de couleurs et de moules. L'approche proposée a été testée sur les données d'une année de production d'une entreprise de fabrication de chaussures de la région de Québec. Les résultats sont parfaitement en accord avec les contraintes et objectifs de l'environnement de production étudié. Diverses simulations ont démontré l'efficacité des procédures développées. Un logiciel complet a été programmé et implanté en entreprise. Le logiciel est actuellement utilisé pour la planification courante de la production.

Remerciements

Cette recherche a été partiellement financée par les subventions OGP0036509 et OGP0172633 du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) que nous remercions. Nous tenons aussi à remercier le président et directeur général de l'entreprise ainsi que le directeur de la planification pour leur précieuse collaboration tout au long de la réalisation de ce projet.

Références

- Allahverdi A., Gupta J. N. D. et Aldowaisan T., A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, **27**, 1999, 219-239.
- Bitran G. R. et Gilbert S. M., Sequencing production on parallel machines with two magnitudes of sequence-dependent setup cost. *Journal of Manufacturing and Operations Management*, **3**, 1990, 24-52.
- Brucker P., Dhaenens-Flipo C., Knust S., Kravchenko S. A. et Werner F., Complexity results for parallel machine problems with a single server. *Journal of Scheduling*, **5**, 2002, 429-457.
- Cheng, T. C. E. et Sin, C. C. S., A state-of-the-art review of parallel machine scheduling research, *European Journal of Operational Research*, **47**, 1990, 271-292.
- Coffman E. G., Garey M. R. et Johnson D. S., An Application of bin-packing to multiprocessor scheduling, *SIAM Journal on Computing*, **7**, 1978, 1-17.
- Garey, M. R., Graham, R. L. et Johnson, D. S., Performance Guarantees for Scheduling Algorithms, *Operations Research*, **26**, 1978, 3-21.
- Garey, M. R. et Johnson, D. S., *Computers and intractability: A guide to the theory of NP Completeness*, 1979, Freeman, San Francisca, CA.
- Gosh J. B., Batch scheduling to minimize total completion time. *Operations Research Letters*, **16**, 1994, 271-275.
- Graham R. L., Bounds on the performance of scheduling algorithms, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, **17**, 1969, 263-269.
- Hall N., Potts C. et Sriskandarajah C., Parallel machine scheduling with a common server, *Discrete Applied Mathematics*, **102**, 2000, 223-243.
- Hsing Y.-T., Trading companies in Taiwan's fashion shoe networks. *Journal of International Economics*, **48**, 1999, 101-120.
- Kim T. W., Ko C. S. et Kim B. N., An agent based framework for global purchasing and manufacturing in a shoe industry. *Computers & Industrial Engineering*, **42**, 2002, 495-506.
- Lawler E. L., Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. et Shmoys D., Sequencing and scheduling: algorithms and complexity. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **4**, 1993, 445-522.
- Lenstra, J. K. et Rinnooy Kan, A. H. G., Complexity of Scheduling Under Precedence Constraints, *Operations Research*, **26**, 1978, 22-35.

- Sun H. et Guoqing, W., Parallel Machine Earliness and Tardiness Scheduling with Proportional Weights, *Computers & Operations Research*, **30**, 5, 2003, 801-808.
- Mokotoff, E., Parallel machine scheduling problems : A survey, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, **18**, 2001, 193-243.
- Mokotoff E., An Exact Algorithm for the Identical Parallel Machine Scheduling Problem, à paraître dans *European Journal of Operational Research*, 2003.
- Mokotoff E., Jimeno J. L. et Gutiérrez A. I., List scheduling algorithms to minimize the makespan on identical parallel machines. *Top*, **9**, 2, 2001, 243-269.