

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE L'ORDONNANCEMENT SIMULTANE DES MOYENS DE PRODUCTION ET DES RESSOURCES HUMAINES

Janvier Laurent Tchommo, Pierre Baptiste, François Soumis *

Résumé. - Alors que de très nombreuses recherches portent sur l'ordonnancement d'atelier, bien peu portent sur l'ordonnancement des ressources humaines et encore moins sur l'ordonnancement simultané des ordres de production et des opérateurs. Si quelques travaux existent sur l'ordonnancement des ressources humaines en vue d'ajuster la capacité à la charge ou sur la définition fine du cycle de travail sur un poste, les manques sont flagrants au niveau de l'ordonnancement. Ce travail met l'accent sur les nombreux manques dans ce domaine.

Mots-clés : ordonnancement, ressources humaines, affectation des opérateurs, durées opératoires variables.

1. Introduction

L'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches nécessitant des ressources ou des processeurs. Les domaines d'application de l'ordonnancement sont nombreux : projets complexes, informatique temps réel, services, etc. Dans un problème d'ordonnancement, il y a quatre notions fondamentales. Ce sont : les travaux (jobs), les ressources, les contraintes et les objectifs. Un travail se définit comme un ensemble de tâches devant être exécutées. Une ressource est un moyen humain ou matériel permettant d'exécuter le

* Ecole Polytechnique de Montréal

travail. Les contraintes représentent les limites imposées par l'environnement. L'objectif est le critère d'optimisation.

En ordonnancement d'atelier, il y a donc deux types de ressources à gérer : les ressources humaines et les machines. La gestion des ressources humaines consiste à affecter dans le temps des opérateurs à des stations de travail composées de machines (ou pas de machines). Les ateliers sont plus souvent en situation de surcapacité machines. Ce qui fait que c'est le nombre des opérateurs qui fluctue et est en général inférieur au nombre de machines.

Le coût des ressources humaines est très élevé, surtout dans les pays industrialisés. L'ajustement charge-capacité des opérateurs intégrant leurs compétences est nécessaire notamment dans les cas où les coûts de main-d'œuvre sont importants et pour lesquels les compétences sont rares et difficiles à acquérir. La mise en place de nouvelles organisations du travail impose également une aide à la gestion des opérateurs. Ce coût des ressources humaines est souvent en ordonnancement le seul coût différentiel.

Dans ce contexte, il est alors nécessaire de planifier avec un horizon moyen terme les possibilités des ressources pour faire face aux variations de charge. La gestion des capacités des opérateurs de production pose alors des difficultés particulières car elles sont particulièrement contraintes en terme de capacité (journalière, hebdomadaire, cumul d'heures supplémentaires, etc.) de variations de capacités et de compétences. On peut aussi vouloir gérer finement les ressources humaines parce qu'elles sont importantes en terme de coût de revient ou parce qu'elles sont critiques en terme de compétence.

La gestion des opérateurs doit être effectuée dans le cadre réglementaire de la législation du travail. La législation offre de nouvelles possibilités, mais la question se pose de l'utilisation efficace de ces nouvelles possibilités pour organiser au mieux la production. En effet, plus de possibilité en gestion impose plus de rigueur pour la planification.

Les recherches sur l'ordonnancement de production (ou ordonnancement d'atelier) sont des plus actives. Elles s'intéressent à des travaux nécessitant plusieurs tâches devant être exécutées sur des processeurs différenciés. De très nombreuses études ont été faites dans ce domaine depuis les précurseurs (Conway, 1967 ou Baker, 1974 par exemple). De nombreux ouvrages de synthèse récents couvrent ce domaine.

De façon indépendante, des travaux ont été menés sur la gestion des ressources humaines. Notons que peu de synthèses ont été fait dans ce domaine. La figure 1 donne la fréquence de certains mots dans le résumé, titre ou mot-clef des articles écrits entre 1993 et 2003 dans une revue de la collection Elsevier et comportant le mot « scheduling » dans le titre (1813 articles).

Shop	Flow-shop	Job shop	Open shop	Parallel	human	Work force	crew	Shift
237	66	133	30	313	33	16	25	24

Figure 1 : Occurrence de mots clefs dans la littérature

Il apparaît donc qu'il y a un manque certain dans la prise en compte des ressources humaines en ordonnancement. Nombreux sont les auteurs (par exemple Sule, 1997; Blasewicz, 1993, Baptiste, 2001) et les praticiens qui ont remarqué que les applications chez les professionnels ne suivent pas le rythme des recherches. Il semble qu'il y ait une grosse difficulté à appliquer les résultats de recherche dans des entreprises manufacturières. Peut-être peut-on au moins partiellement expliquer cela par l'absence quasiment totale de travaux intégrant les deux aspects de l'ordonnancement.

Baptiste (2001) schématise l'utilisation d'un logiciel d'ordonnancement (figure 2) par trois boucles de contrôle : la première consiste à faire des décales locaux, la seconde à modifier les règles de priorités utilisées dans le logiciel, la dernière consiste à modifier les calendriers et les affectations des opérateurs que les logiciels considèrent comme des données d'entrée. La prise en compte des ressources humaines est donc essentiellement laissée à la charge de l'utilisateur du logiciel. De plus, tous les logiciels font l'hypothèse que les durées des tâches sont connues alors que depuis les débuts de l'automatisation, les opérateurs interviennent de plus en plus comme servant des équipements (Crocchi et al.2000) et peuvent servir plusieurs machines en parallèle. Dans ce contexte, la productivité d'un équipement est très souvent fonction du nombre d'équipements à la charge du même opérateur.

De cette analyse, il ressort que l'intégration de l'ordonnancement des ressources humaines et des tâches doit se faire à deux niveaux : au niveau de la concordance des calendriers et au niveau de la prise en compte de l'affectation des opérateurs dans le calcul des durées opératoires.

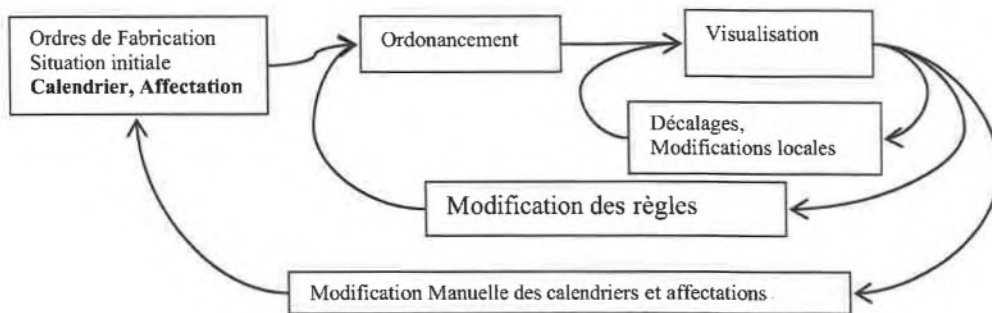


Figure 2 : Utilisation d'un logiciel d'ordonnancement

La première partie de notre étude sera consacrée à une synthèse rapide des travaux faits dans le domaine de l'ordonnancement des ressources humaines afin de comprendre comment ces travaux pourraient (ou peuvent) intégrer l'aspect « tâche », et, en particulier, aider à mettre en concordance les calendriers.

La seconde partie se concentrera sur les quelques modèles intégrés trouvés dans la littérature. Ces modèles seront soit hiérarchiques (ordonnancement des tâches suivi de la prise en compte des ressources humaines) soit conjoints

La dernière partie synthétisera les travaux d'ordonnancement au sein desquels les durées des tâches ne sont pas constantes. Ces travaux ne sont pas tous initiés par la prise en compte des opérateurs mais certains peuvent être réutilisés dans ce contexte.

2. Ordonnancement des RH

De manière générale le manager doit résoudre trois problèmes : l'assignation des travailleurs à des équipes « shift scheduling », la détermination des cycles d'intervention des travailleurs (« tour scheduling ») et la gestion des congés (« day-off scheduling »).

Tien et Kamiyama (1982) définissent l'assignation des travailleurs comme la demande en main-d'œuvre nécessaire dans chaque équipe et chaque jour pour que la demande soit satisfaite. L'assignation détermine aussi selon eux le niveau de main-d'œuvre, par exemple la détermination du nombre minimum de travailleurs nécessaires pour satisfaire la demande durant un horizon de planification.

2.1 « Day-off scheduling »

La gestion des ressources humaines implique un ajustement période par période de la capacité à la charge. Il faut alors vérifier si cet ajustement théorique respecte bien les contraintes de variation admissible en terme de durée journalière, hebdomadaire, annuelle mais aussi en terme de variation. Généralement, l'ordonnancement des congés des travailleurs est traité suivant l'angle du cycle de travail, ou suivant un volume horaire de travail à effectuer pendant une période.

Suivant le cycle de travail : Hung (1994) et Billionnet (1998) considèrent le nombre de jours de congés hebdomadaires ; chaque travailleur a droit à n jours de congé par semaine, $n=2,3...5$ respectivement. Burn et Carter (1985) étudient le cas où le besoin en travailleurs est fixe en semaine, et différent la fin de semaine. Chaque travailleur a droit à un congé hebdomadaire de 2 jours et aucun travailleur ne peut travailler sur une durée continue de plus

de 6 jours. Emmons et Burns (1991) ont étudié l'ordonnancement cyclique dans le cas d'une main-d'œuvre hiérarchique, avec des contraintes de jours de congés. Ils ont proposé une formulation explicite et des algorithmes pour trouver un ordonnancement réalisable. Emmons et Fuh (1997) ont considéré un problème de *day-off* pour une semaine comptant 7 jours de travail. La demande journalière est constante. Ils considèrent deux catégories de travailleurs à temps partiel pour suppléer les travailleurs permanents. La première catégorie est constituée d'un nombre limité de travailleurs, moins coûteux que les travailleurs permanents. La deuxième catégorie est formée de travailleurs, disponibles en grand nombre, mais plus coûteux que les travailleurs permanents. Chaque permanent doit prendre deux jours de congés par semaine. Ils ont développé une formulation pour former l'équipe la moins coûteuse, et mis au point un algorithme pour trouver un ordonnancement réalisable.

Suivant le volume horaire : Grabot (2000) pose les hypothèses suivantes : volume horaire hebdomadaire fixe pour chaque travailleur (par exemple, 35 heures), un seul repos par jour de travail, repos d'une durée maximale (2 heures), si la durée du travail est de plus de 6 heures, alors un repos minimal de 20 mn, durée de travail maximale par jour, durée minimale par semaine. Le programme de travail de chaque employé doit lui être communiqué au moins une semaine à l'avance.

2.2 « *Shift scheduling* »

Le problème de quart de travail (calendrier d'équipe) est présent dans la plupart des organisations, surtout dans les entreprises de service qui sont confrontées à des charges variant tout au long de la journée. Un quart est une combinaison de temps de début, temps de fin emplacement des pauses. Ce problème a reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs. Le premier à proposer une formulation mathématique est Dantzig (1954). Il propose une méthode basée sur un modèle de set covering généralisé dans lequel chaque shift est représenté par une variable de décision. Thompson (1995) a développé un algorithme exact pour la résolution des problèmes de formation de quarts de travail avec planification de plusieurs pauses de durées fixes. Aykin (1996) a étudié les problèmes comportant plusieurs pauses et des intervalles de pauses. Jacobs et Brusco (1998) ont considéré un problème d'ordonnancement de cycle de production où le nombre de quarts de travail est limité, et un temps minimum est fixé entre deux quarts consécutifs. Schindler et Semmel (1993), Brusco et Jacobs (1998) ont étudié les cas complexes où il y a des restrictions qui imposent un nombre maximum d'heures de début de quarts et un temps minimum qui sépare deux quarts différents. La plupart de ces modèles sont des modèles implicites.

2.3 « *Tour scheduling* »

Lorsqu'on doit déterminer simultanément les quarts de travail journaliers et les jours de congé, il s'agit du problème de *tour scheduling*. La complexité du problème dépend des organisations. Par exemple dans une organisation où les jours de travail sont fixes (ex. lundi à vendredi), le problème se réduit à un problème de quart de travail. D'un autre côté, lorsque les quarts de travail sont fixes (la même heure de départ, la même heure de fin et les mêmes pauses) le problème se réduit à celui de l'ordonnancement des congés.

Un problème de *tour scheduling* dans un horizon continu de 7 jours sur 7 et 24 heures sur 24 est d'une très grande complexité. Bartholdi (1981) a montré qu'il est N-P complet.

Vairaktarakis et al. (2002) montrent que le problème d'affectation de travailleurs dans un horizon donné et dans un système de production qui compte plus de 3 stations de travail est N-P complet. Ils proposent des heuristiques pour le résoudre. Chen (1994) a défini les heuristiques « *cycle switching rules* » et le « *dynamic scheduling rules* » suivant les cas. Le CRS, dans un contexte où les règles de décision sont définies pour le long terme. Le CRS peut fournir la solution optimale si les conditions sont respectées. Le *dynamic scheduling rules* dans un contexte de planification à très court terme. Le DSR peut intégrer les changements dans une base de temps réel. Lorsqu'il survient des imprévus, le DRS a le potentiel d'affecter les opérateurs pour une performance meilleure. Burns et Koop (1987) ont présenté un algorithme exact pour résoudre le problème de construction d'horaires de personnel impliquant des cycles et des quarts de travail sur un horizon continu.

2.4 *Compétence et ordonnancement des ressources humaines*

Même lorsqu'on connaît les chiffres moyens sur la productivité, l'efficacité selon laquelle on exécute une tâche est largement tributaire du taux de productivité des ressources utilisées. Les compétences dont il est question ici sont les compétences techniques ou professionnelles : cette catégorie désigne la capacité d'exécuter des tâches spécialisées. Les compétences de ce type peuvent s'appliquer à une industrie particulière, par exemple la réparation des automobiles, ou à un ensemble d'activités : programmation informatique, maintenance, etc. Croci et al. (2000) étudient, par des méthodes expérimentales, l'effet que les politiques d'allocation des opérateurs sur les machines a sur la performance d'un système très automatisé. Ils s'intéressent surtout à un contexte où il y a moins d'opérateurs que de machines. Ils montrent qu'une bonne allocation des travailleurs accroît leur taux d'utilisation et augmente l'efficacité avec laquelle ils accomplissent les tâches. Dans la littérature, on rencontre plusieurs types de compétences :

- Compétence par rapport aux tâches : le travailleur ne peut exécuter que des opérations bien spécifiques, et cela indépendamment de la machine utilisée.

- Compétence par rapport aux machines : chaque travailleur est qualifié pour exécuter n'importe quelle opération, mais sur un ensemble de machines spécifiques (voir Croci et al. 2000). Le travailleur ne peut donc pas travailler sur toutes les machines. L'affectation par machine a comme avantage qu'elle implique peu de changement de poste de travail. Elle sera dès lors rentable si le taux d'utilisation des machines est élevé. Bourland (1994) parle de personnes dont la spécialité est de préparer un ensemble de machines avant chaque lot (set up).
- Compétence « mixte » : il existe des travailleurs qualifiés pour opérer sur plusieurs centres de travail et exécuter plusieurs types de tâches. Les travailleurs bien formés ayant cette caractéristique peuvent opérer efficacement dans des cellules flexibles de production pour répondre rapidement au changement des demandes en produits et en volume. Vairaktarakis (2000) fait allusion à ce type de compétence. Kher (2000) parle de travailleurs formés pour travailler dans divers départements.
- Compétences hiérarchisées : Hung, (1994), Billionnet (1998), Emmons et Burn (1990), classifient les compétences en plusieurs types. Ensuite les types sont classés sur une échelle hiérarchique. Un travailleur plus qualifié peut se substituer à un travailleur moins qualifié, mais pas l'inverse.
- Compétence par équipe de travailleurs : un shift est formé par un certain nombre de travailleurs qui comptent tous un ensemble global de compétences (Grabot, 2000).
- Compétence par contrat : Kher (1999) parle de compétence de certains travailleurs à répondre aux exigences spécifiques des clients vitaux. La règle d'affectation des opérateurs prend en compte la disponibilité des travailleurs dans les différents départements qui contiennent des commandes destinées aux clients vitaux. Lee (2002) s'intéresse à l'effet du réajustement périodique de l'affectation des travailleurs avec des aptitudes différentes sur les dates dues.

Pendant même lorsqu'on connaît le niveau de compétence, la productivité des opérateurs est aussi tributaire des règles d'affectation.

Variation des niveaux de compétence. Cheng (1994) parle de l'accroissement du rendement des opérateurs par la détermination de la séquence de leurs activités (chargement, déchargement, marche, attente) connaissant la séquence des machines qui vont effectuer les opérations. Croci et al. (2000) vont dans le même sens et montrent comment la façon dont sont affectés les opérateurs influe sur leur compétence.

3. Durée de tâches variables

Il est donc important de regarder les travaux considérant les durées opératoires non plus comme des données mais comme des variables.

Comme le note Croci et al. (2000), les opérateurs (dont le rôle se limite souvent à de la surveillance, du chargement déchargement et du contrôle) sont de plus en plus souvent affectés à plusieurs machines. Ces affectations multiples perturbent les vitesses de production et conditionne les durées des tâches.

Bourland (1994) parle d'opérateurs fractionnels dans un système avec des machines parallèles. Ici un opérateur peut s'occuper de plusieurs machines adjacentes. Le nombre d'opérateurs requis est déterminé par la combinaison des pièces en production. La fraction d'un opérateur sur une machine consiste en la proportion de son temps consacrée à ladite machine. La planification se fait à l'intérieur d'un cycle commun à toutes les machines.

Cheng et al. (1999) traitent du cas d'un opérateur sur deux machines dans un flowshop. Vembu et Srinivasan (1996) ont étudié le problème d'un opérateur dans une cellule de production composée de machines manuelles et ont proposé une heuristique pour le résoudre. Chen (1995, b) a également étudié le problème de cellules supervisées par un opérateur, en s'intéressant aux mouvements de l'opérateur entre les machines.

Ng et al. (2003) ont étudié un problème d'ordonnancement de tâche sur une seule machine. Les durées des tâches sont variables et dépendent des ressources allouées. Les ressources sont utilisées pour réduire les temps de set up et les durées des tâches. L'objectif est de minimiser une combinaison linéaire de la date due et des coûts des ressources. Les valeurs des dates dues peuvent être continues ou discrètes. La fonction de coût peut être non monotone. Janiak et al. (2003) proposent un algorithme génétique pour l'optimisation de la séquence des tâches et la consommation des ressources. L'ordonnancement se fait sur une machine et les tâches sont regroupées sur la base de la technologie de groupe.

D'autres travaux évoquent d'autres causes de durée variable des tâches (non liés aux opérateurs). Globalement, il y a 5 autres causes de durées opératoires variables traitées par les chercheurs dans la littérature :

- les compétences. Grabot (2000) et Kher (2000) se sont intéressés sous diverses formes au concept d'apprentissage et d'efficacité entraînant des durées variables.
- l'apprentissage. Plusieurs auteurs mettent l'accent sur le fait qu'un opérateur lui-même peut avoir une efficacité variable. On trouve des études intéressantes sur l'apprentissage (Mosheiov, 2001 et 2003 et Arditi et al. 2001) et sur la fatigue (Dondetti, 1998).

- le coût. Bien que sans rapport direct avec les ressources humaines, le coût est la principale cause de modélisation de durées variables. On trouve plusieurs travaux (comme Chen, 1997) utilisant le concept de « controllable processing time ».
- le refroidissement. Dans certains secteurs comme l'industrie du métal, le refroidissement a été étudié (par exemple dans Wagner, 1998) comme pouvant induire des durées variables.
- finalement, dans certains cas les conditions des systèmes de production eux-mêmes (états des outils, des posages) peuvent être prises en compte pour moduler les durées.

Globalement, force est de constater que le nombre de travaux considérant les durées comme variables est extrêmement faible.

4. Approches utilisées en ordonnancement simultané

Finalement, l'essentiel de la littérature est loin de l'intégration de l'ordonnancement des tâches et des ressources humaines. Pour le « shift scheduling » par exemple, les jobs sont connus à travers une notion agrégée de volume global. Par contre, pour l'ordonnancement classique on ignore complètement les opérateurs. Finalement très peu d'articles traitent de l'intégration. Ils proposent deux visions de cette intégration :

4.1 Ordonnancement séquentiel (*Approche à plusieurs phases*)

L'approche la plus courante de l'ordonnancement de production et des ressources humaines est une approche à deux étapes voire à trois étapes. On ordonnance d'abord les machines. Il existe dans la littérature un éventail très large de travaux qui ont traité l'ordonnancement de production, dans tous les types de systèmes. Il s'agit notamment de l'ordonnancement de machines parallèles, de flow shop, de job shop, de la gestion de projets. Le but de notre étude n'est pas de nous y attarder.

Lorsque le calendrier machine est obtenu, il s'agit de déterminer un volume global de ressources humaines pour couvrir un besoin connu agrégé. L'ordonnancement des ressources humaines considère la production comme une simple requête en terme de volume requis par unité de temps (l'ordonnancement des tâches n'est pas encore effectué). La planification de la main-d'œuvre se fait sans tenir compte de la disponibilité des travailleurs, de leurs compétences ou de leur préférence.

L'étape suivante consiste en l'affectation des tâches aux employés. C'est la détermination des postes de charge et l'affectation des travailleurs dans des équipes. Dans certains cas, le calendrier des opérateurs est utilisé pour créer le calendrier d'ouverture des machines.

Un exemple d'ordonnancement en deux phases est le domaine du transport aérien, la fabrication d'horaires mensuels de travail pour les membres d'équipage. La première phase consiste à construire un ensemble de séquences de vols, appelées rotations, qui couvrent l'ensemble des segments de vols (Desaulniers et al.1997, Lavoie et al.1998). La deuxième phase consiste à construire pour chaque membre d'équipage un horaire mensuel de travail composé de rotations, de repos et d'autres activités spéciales (congrés annuels, examens médicaux, etc.). C'est un problème d'affectation de personnel sur des machines parallèles. Ici, on a un ou plusieurs opérateurs travaillant simultanément sur une machine. Les avions représentent les machines alors que les opérateurs composent l'équipage.

4.2 Ordonnancement conjoint (*simultané*)

L'ordonnancement conjoint utilise une approche à une seule phase. Cette approche tient compte des informations sur les travailleurs au moment du développement du planning. Il est considéré, par exemple, la restriction du nombre de travailleurs ou de leurs compétences.

La prise en compte simultanément des deux axes, ordonnancement de la production et des opérateurs, est finalement très rare. Grabot (2000) aborde le problème en tenant compte de la productivité relative des opérateurs.

Bourland (1994) initie le travail en s'intéressant à l'ordonnancement sur machines parallèles avec une contrainte ressource humaine sous forme de fraction, en d'autres termes la ressource humaine est partagée. L'affectation des ressources humaines tient compte de la compétence des travailleurs, ainsi que des contraintes sociales liées à la législation du travail. Alors que l'approche classique se fait en deux étapes, Cordeau *et al.* (2001) ont introduit l'ordonnancement conjoint dans le domaine du transport aérien pour la confection des rotations d'avions et les horaires des équipages. Ils utilisent pour ce faire la décomposition de Benders.

4.3 Approches logiciels

Aussi critiquable qu'ils puissent être, les logiciels d'ordonnancement de production sont là pour combler le manque de résultats formels. Les logiciels comme ORTEMS, INCOPLAN ou autres permettent dans une certaine mesure d'intégrer les deux aspects. Le plus souvent, les opérateurs sont, comme les ressources machines, regroupés par groupes interchangeables (opérateurs équivalents). Les jobs sont réputés consommer des quantités d'opérateur (pouvant être de groupes différents, régulier au début opérateur à la fin, ou bien en charge variable, plus au début et moins à la fin, etc.). De là, ils abordent ce problème de deux manières différentes :

- à capacité infinie (seule la demande est donnée, à charge à l'utilisateur de lisser lui-même cette charge en jouant sur les calendriers d'ouverture des machines)
- à capacité finie. Dans ce cas, aucune information n'est disponible sur les algorithmes utilisés. Il s'agit toutefois d'algorithmes de listes.

Par contre, aucun logiciel ne semble prendre en charge correctement l'affectation multiple des opérateurs et la notion de durée variable (sauf dans le cas de cellule de production ou l'agrégation est possible si les équipements travaillent sur le même lot).

5. Typologie des articles lus

Globalement, l'ensemble des articles peut se structurer suivant 4 dimensions : le modèle d'atelier (côté ordonnancement classique), la problématique ressources humaines concernée, le modèle de l'intégration et les outils de résolution.

		[9]	[7]	[14]	[18]	[13]	[25]	[15]	[24]	[36]	[43]
Modèle d'atelier (1)		P		F	G	F		J	S	G	J
Ressources humaines (2)		A	S	T	Tr	T	D	T	D	T	Tr
Modèle d'intégration	Nature (3)	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h
	Critères (4)	C	C	Ts	C	Ts	C	Ts	C	C	C
	Affectation (5)	F	I	F	I	F	I	F	I	U	I
	Durées (6)	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Outils de résolution		Pl	Pl	H	H	H	H	H	H	A	H

- (1) F : Flow shop ; J : Job Shop ; P : machines parallèle s ; G : Général
 (2) S : shift scheduling ; T : Tour scheduling ; D : day-off scheduling ; Tr : transport-déplacement ; A : autre.
 (3) H : Hiérarchique ; C : conjoint
 (4) T : lié au temps ; C : lié au coûts ; E : efficacité ; A : autre
 (5) I : un opérateur par machine ; F : fractionnaire ; I : indéfini.
 (6) F : vitesse fixe, V : vitesse variable
 (7) M : métaheuristique ; H : heuristique ; BB : branch and bound ; Pl : programmation lineaire ; A : autre.

6. Conclusion

De cette étude, il ressort un manque flagrant d'outils et de modèles formels pour l'intégration des deux types de ressources. L'ordonnancement de la production doit tenir compte simultanément des charges des machines et de la disponibilité des opérateurs. Dans un contexte où les entreprises doivent répondre de manière flexible à la demande sans cesse fluctuante, les situations où des opérateurs sont partagés entre plusieurs machines ou stations de travail deviennent régulières. L'une des conséquences directes de la nécessité d'ajuster la disponibilité des opérateurs à la charge des machines est la durée opératoire variable. Très peu d'études ont proposé des modèles qui en tiennent compte.

Globalement, deux pistes semblent ouvertes pour les recherches sur l'intégration des deux facettes de l'ordonnancement : des méthodes intégrant des aspects du « tour scheduling » et le « Job scheduling » pour créer simultanément des calendriers opérateurs et des séquences de Jobs, des méthodes pour intégrer les durées variables dans l'ordonnancement d'ateliers.

Il est vraisemblable que le manque d'intérêt des chercheurs sur ces thèmes (qui peut s'expliquer par le fait que les autres applications de l'ordonnancement n'ont pas ces spécificités) est partiellement responsable de la faible percée des outils d'ordonnancement en production.

7. Références

- [1] Arditi, D., Tokdemir O.B, Suh K. (2001). Effect of learning on line balancing scheduling, *International Journal of Project Management*, 19, pp. 265-277.
- [2] Aykin T. (1996) Optimal shift scheduling with multiple break windows. *Management science*, 42(4):591-602.
- [3] Aykin, T. (2000). A comparative evaluation of modeling approaches to the labor shift scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, Volume 125, Issue 2, pp. 381-397.
- [4] Baker, K.R. (1974). *Introduction to Sequencing and Scheduling*, Wiley, New York. NY.
- [5] Baptiste, P. (2001). « L'ordonnancement d'atelier », dans « Performances Industrielle et gestion des flux », édition Hermès, ISBN 2-7462-0297-2, pp. 113-151.
- [6] Bartholdi J.J. (1981). A guaranteed-accuracy round-off algorithm for cyclic scheduling and set covering. *Operational Research*, 29:501-510.
- [7] Billionnet, A. (1999). Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands. *European journal of operational research* 114, 105-114.
- [8] Blazewicz J., Ecker K., Schmidt G. et Weglarz J. (1993). *Scheduling in computer and manufacturing systems*. Ed Springer-Verlag, ISBN 3-540-55958-2.
- [9] Bourland, K.E., Carl L. K. (1994). Parallel-machine scheduling with fractional operator requirements, *Iie*, Vol. 26, No. 5, pp.56-65.

- [10] Bruco, M.J. et Jacobs, L.W. (1998). Personnel tour scheduling when starting-time restrictions are present. *Management Science* 44, 538-547
- [11] Burn R.N. et Carter M.W. (1985). Work force size and single shift schedules with variables demands. *Management Science*, 31:599-607.
- [12] Burns, R.N. et Koop, G. J. (1987). A modular approach to optimal multiple-shift manpower scheduling. *Operational research* 35, 100-110.
- [13] Chen H.G., (1995). Operator scheduling approaches in group technology cells-information request analysis," *Ieee Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 25, No.3.
- [14] Cheng, T.C., Wang G., Sriskandarajah C. (1999). One-operator-two-machine flowshop scheduling with set-up and dismounting times, *Computers & Operations Research*, Volume 26, Issue 7, pp. 715-730.
- [15] Chen, H. G.(1995).Heuristics for operator scheduling in group technology cells, *Computers Ops Res.* Vol. 22, No 3, pp. 261-276.
- [16] Conway, R.W., Maxwell, W.L. and Miller L.W. (1967). *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley, Reading, MA.
- [17] Cordeau, J.- F, Stoskovic G., Desrosiers J., Soumis, F. (2001). Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling, à paraître dans *Transportation Science*.
- [18] Croci, F., M. Perona,, Pozzetti A. (2000). Work-force management in automated assembly systems, *Int. J. Production Economics* 64, pp. 243-255.
- [19] Dantzig (1954).A comment on Edie's traffic delay at toll booths", *Operations Research*, 2 (3), 339-341.
- [20] Desaulniers, G., Desrosiers, J., Gamache, M.et Soumis F. (1998). Crew scheduling in air transportation. *Fleet Management and Logistics*, T.G. Crainic et G. Laporte (eds), Kluwer, Norwell, MA, 169-185.
- [21] Dondetti, R., Mohanty B. (1998). Impact of learning and fatigue factor on single machine scheduling with penalties for tardy jobs, *European Journal of Operational research*, 105, pp. 509-524.
- [22] Emmons H. and Burns R. N.(1991) Off-day scheduling with hierarchical worker categories", *Operations Research*, 39 (3), 484-495, 1991
- [23] Emmons H. et Fuh D.,(1997). Sizing and scheduling a full-time and part-time workforce with off-day and off-weekend constraints, *Annals of Operations Research*, 70, 473- 492.
- [24] Grabot, B., Letouzey A. (2000). Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirements and DSS prototyping, *Computers in Industry*, Volume 43, Issue 1, pp. 11-29.
- [25] Hung, R. (1994). Single-shift off-day scheduling of a hierarchical workforce with variable demands" *European Journal of Operational Research* Vol.78, pp.49-57.
- [26] Jacobs L.W. et Brusco M.J. (1998). Personnel tour scheduling when starting time restrictions are present. *Management Science*, 44:534-547.
- [27] Janiak A., Kovalyov M.Y. et Portmann M.C. Single machine group scheduling with resource dependent setup and processing times. *European Journal of Operational Research* Article in Press.

- [28] Kher, H.V. (2000). Examination of worker assignment and dispatching rules for managing vital customer priorities in dual resource constrained job shop environments, *Computers & Operations Research* 27, pp.525-537.
- [29] Lavoie. S., Minoux M., Odier E. (1988). A new approach of crew pairing problems by column generation and application to air transportation. *European Journal of Operational Research*, 35, 45-58.
- [30] Lee, T. (2002). The effect of workers with different capabilities on customer delay, *Computers & Operational Research* (article en presse).
- [31] Mosheiov, G. (2001). Scheduling problem with a learning effect. *European Journal of operational research* (2001) 132, pp 687-693.
- [32] Mosheiov, G., Sidney J. (2003). Scheduling with general Job Dependant learning curves, *European Journal of Operational Research* to appear.
- [33] Ng C.T.D., Cheng T.C.E, Kovayov M.Y., Lam S.S. (2003). Single machine scheduling with a variable common due date and resource-dependent processing times. *Computers & Operations Research* Volume 30, Issue 8, July 2003, Pages 1173-1185.
- [34] Omari, Z. (2002). Attribution des activités aux employés travaillant sur des quarts. *Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.*
- [35] Pinedo, M. (1995). Scheduling theory algorithms and systems, prentice hall, *englewood cliffs, New Jersey.*
- [36] Rekik, M., J.-F Cordeau, F. Soumis (2002). Using Bender decomposition to implicitly model tour scheduling .*Les Cahiers du Gerad, ed. Montrea.l*
- [37] Schindler S. et Semmel T. (1993). Station staffing at Pan American Word Airways. *Interfaces*, 23:91-98.
- [38] Sule D.R.(1997). Industrial scheduling. *PWS Publishing Compagny, ISBN 0-534-95456-1.*
- [39] Tien J., et Kamiyama A. (1982). On manpower scheduling algorithms. *SIAM Review* 24, 275-287.
- [40] Thompson, G.M. (1995). Improved implicit optimal modeling of the labor shift scheduling problem. *Management science* 41, 595-607.
- [41] Vairaktarakis, G. L., Cai X., Lee C. Y. (2002). Workforce planning in synchronous production systems. *European Journal of Operation Re search* 136, pp. 551-572.
- [42] Vatri, E. (2001). Intégration de la generation des quarts de travail et de l'attribution d'activités. *Mémoire de maîtrise, École Polytechnique, Montréal.*
- [43] Vairaktarakis G., Lee X.Q. (2000). Workforce Planning in Synchronous Production Systems. *European Journal of Operations Research, Accepted, 2000.*
- [44] Vembu S., Srinivasan G. (1997). Heuristics for operator allocation and sequencing in product-line-cells with manually operated machines. *Computers ind.vol.32, No.2, pp.265-279.*
- [45] Wagneur, E., Chelliah S. (1998). Flow-shop scheduling in the metal industry *IEEE Conference on Control Applications - Proceedings, 2*, pp. 925-929 *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications. Part 2, Trieste, Italy.*