

Rapport Technique CREGI-2004-12-DDRMA : Optimisation et Simulation Multicritère en Industrie Semi-Continue

V. Dhaevers¹, D. Duvivier¹, O. Roux¹, N. Meskens¹ et A. Artiba²

¹ Facultés Universitaires Catholiques de Mons
151 Chaussée de Binche, B-7000 Mons – Belgique,
[\[dhaevers,duvivier,roux,meskens\]@fucam.ac.be](mailto:[dhaevers,duvivier,roux,meskens]@fucam.ac.be)

² École de Technologie Supérieure,
1100 Rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec) H3C 1K3 - Canada,
abdelhakim.artiba@etsmtl.ca

Résumé. Cet article porte sur l'aide à la décision dans le cadre de l'ordonnement de la production en industrie semi-continue. Le souci de réutilisabilité et de modularité de l'outil mis au point nous a conduits à développer une plate-forme « générique » centrée sur la planification, l'ordonnement et la simulation des processus de production. La nécessité de générer rapidement des solutions offrant de bons compromis entre des objectifs bien souvent antagonistes nous a amenés à intégrer une méthode multicritère au sein de notre plate-forme. L'étude présentée dans cet article synthétise les résultats de l'application de cette plate-forme à un système de production semi-continu fortement contraint.

Mots-Clefs. Aide à la décision ; Ordonnement ; Simulation.

1 Introduction

Dans le cadre des processus de production de type discret ou semi-continu organisés en jobshop généralisé, nous avons développé une plate-forme « générique » centrée sur l'optimisation et la simulation des problèmes de planification et d'ordonnement [5]. Lors de l'étude de problèmes concrets, il apparaît clairement que les méthodes d'optimisation exactes sont limitées par leurs exigences en temps de calcul et en espace mémoire. La méthode retenue doit être capable de surmonter la difficulté de reproduire précisément le fonctionnement réel d'un atelier de production en un temps raisonnable. Pour ce faire, notre plate-forme repose sur plusieurs modèles hybrides combinant la simulation avec plusieurs méthodes d'optimisation. Cette plate-forme, nommée *PlanOrdo*, est composée de modules réutilisables, organisés autour d'une base de données. Le module d'ordonnement comporte un ensemble de méthodes sérielles classiques telles que SPT, LPT [5] ainsi que des méthodes sérielles spécifiques. Le modèle de simulation est conçu pour tenir compte des moindres détails de fonctionnement du processus de production sous-jacent. Dans le cas d'un processus semi-continu deux approches ont été envisagées au sein de notre plate-forme. Si la « partie continue » du processus simulé est modélisable à l'aide d'équations mathématiques simples, ces dernières sont intégrées dans le modèle de simulation. Par contre, si la « partie continue » du processus simulé s'avère plus complexe à modéliser ou à résoudre, la solution retenue consiste à coupler notre simulateur à un solveur externe.

Concernant l'optimisation du processus de production, nous avons étudié l'efficacité de divers outils appliqués à des problèmes industriels [6, 11, 14, 20]. Dans cet article, nous nous focalisons sur l'utilisation de méthodes hybrides constituées de méthodes sérielles couplées à notre modèle de simulation et à une méthode multicritère. Loin de constituer la panacée, nous sommes parfaitement conscients des limitations des méthodes sérielles notamment en termes de garantie et/ou de qualité de résultats (du point de vue de l'optimalité des solutions, de la robustesse...). Un argument en faveur des méthodes hybrides est induit par le besoin de réactivité des entreprises. En effet, la rapidité de la prise de décision peut s'avérer cruciale dans la course à la performance exigée par le contexte économique actuel. Une solution « acceptable » n'est pas nécessairement une solution optimale, mais souvent une solution satisfaisante obtenue en un temps raisonnable.

Par rapport aux problèmes « académiques » (*flowshop*, *jobshop*, *openshop* issus de la « *OR-Library* » par exemple [27]) la prise en compte de problèmes industriels nécessite un surcroît d'effort de recherche et de développement considérable qu'il s'agit de capitaliser au sein de notre plate-forme. Cet effort vise notamment à maintenir un compromis judicieux entre la nécessité d'adapter et de spécifier la méthode au problème traité (par soucis d'efficacité des méthodes), et la possibilité d'appliquer la méthode à un grand nombre de problèmes (généricité des méthodes). En outre, notre plate-forme fournit un « banc d'essai » pour comparer différentes stratégies d'ordonnement et déterminer dynamiquement la stratégie la plus adaptée au contexte. Ce contexte peut

notamment prendre en compte l'environnement économique et la forte variabilité de la demande. Chaque stratégie d'ordonnement est constituée de deux phases : l'utilisation d'une méthode sérielle suivie de l'exécution d'un modèle de simulation. La première fournit la solution initiale. La deuxième transforme celle-ci en un ordonnancement des commandes auquel est associé un ensemble d'indicateurs de performance.

Lors de la résolution de problèmes industriels, la nécessité de générer des solutions offrant de bons compromis entre les objectifs souvent antagonistes de l'entreprise nous a amenés à intégrer une méthode multicritère au sein de notre plate-forme afin de classer les stratégies d'ordonnement.

Cette étude synthétise les résultats de l'application de la plate-forme dans une entreprise ayant un système de production semi-continu fortement contraint [6, 11]. De nombreuses contraintes liées notamment à l'hétérogénéité des postes de travail, aux différents types de temps de préparation (notés *setups*) à prendre en compte et à la gestion des ressources auxiliaires rendent ce problème particulièrement difficile à appréhender en termes de modélisation, d'optimisation et de simulation. Au-delà de l'hybridation de plusieurs méthodes issues de différents domaines de recherche (modélisation, optimisation, simulation, performance), l'un des points forts de nos travaux est la prise en compte des ressources auxiliaires. Une autre originalité de nos travaux réside dans la précision du modèle de simulation sous-jacent ainsi que dans la diversité des indicateurs de performance et des stratégies d'ordonnement disponibles au sein de notre plate-forme.

Il est à noter que *PlanOrdo* peut intégrer différentes méthodes d'optimisation telles que des méta-heuristiques ou des méthodes exactes afin d'optimiser la planification et/ou l'ordonnement de la production [6, 11]. Cependant, cet article se concentre sur les aspects liés au couplage entre le modèle de simulation et la méthode multicritère lors de la comparaison de plusieurs stratégies d'ordonnement.

Le contexte de validation de notre plate-forme est maintenant défini. Le plan suivi pour présenter notre étude est le suivant : nous décrivons notre plate-forme en section 2, nous exposons le « problème Fontainunion » en section 3, nos résultats sont synthétisés en section 4, nous concluons ensuite l'exposé de notre étude en présentant quelques perspectives de nos travaux.

2 Plate-forme *PlanOrdo*

PlanOrdo est une plate-forme « générique » centrée sur la simulation et l'optimisation des problèmes de planification et d'ordonnement de types discrets ou semi-continus. Dans le contexte de l'étude présentée, la généralisation de nos résultats s'applique aux problèmes d'ordonnement de type jobshop généralisés tels qu'ils sont définis en section 3. S'inspirant du paradigme « diviser pour régner », notre plate-forme repose sur plusieurs modèles hybrides constitués d'un ensemble de modèles coopérants : l'un d'eux au moins est dédié à la simulation tandis qu'un autre prend en charge les aspects liés à l'optimisation du problème.

2.1 Description

Guidés par un certain nombre de concepts issus du génie logiciel, nous avons conçu notre plate-forme sous forme de modules réutilisables, organisés autour d'une base de données. Cette organisation extrêmement souple permet d'intégrer un grand nombre d'outils complémentaires mis à la disposition des décideurs avec pour but commun de fournir une aide à la décision aussi complète, précise et robuste/fiable que possible.

L'interface graphique de *PlanOrdo* pilote un certain nombre de modules décrits succinctement ci-dessous. Le module d'ordonnement comporte un ensemble de méthodes sérielles classiques (telles que « *Shortest Processing Time* »...). Elles présentent toutefois un inconvénient majeur lié à leur faible robustesse. En effet, ces règles ne sont pas toujours très performantes lors de la variation de certains paramètres tels que la charge de l'atelier ou les variations de la *taille*¹ des commandes [5, 12, 21, 23]. Afin de pallier cette faiblesse, les ordonnancements fournis par ce module peuvent être améliorés par le module d'optimisation. Ce dernier peut prendre plusieurs formes. Il est réduit à un algorithme de tri (selon les critères optimisés) dans le cas où seules les méthodes sérielles sont utilisées et est remplacé par une méthode d'optimisation (méta-heuristique ou méthode exacte) dans le cas général [6, 11]. Le module de performance est capable de générer de nombreuses statistiques sous forme de rapports, courbes d'évolution, diagrammes de Gantt... Il peut établir un lien vers des outils externes (tableurs...). Afin de garantir l'indépendance de *PlanOrdo* vis-à-vis des outils sous-jacents, plusieurs modules gèrent l'interfaçage entre les composants de la plate-forme et les outils externes (MES/ERP de l'entreprise, bases de données, tableurs, solveurs...). D'autres modules existent dans la plate-forme, cependant ces derniers sont hors du contexte de cet article.

¹ La taille d'une commande est définie par le nombre d'unités à produire.

Accessible au travers du module d'ordonnancement, le modèle de simulation de *PlanOrdo* est basé sur notre simulateur *RAO* [2]. Compte tenu de la complexité des problèmes industriels auxquels s'adresse *PlanOrdo*, la présence d'un modèle de simulation est pleinement justifiée par l'absence de fonctions/modèles analytiques suffisamment précis et/ou suffisamment rapides. Ce modèle est principalement composé d'un ensemble de *patterns* génériques (décrivant le fonctionnement de ressources génériques/standards), complété d'un petit nombre de *patterns* dédiés au problème étudié. Ces derniers peuvent être facilement générés à partir de notre modélisation graphique *ALIX* [17].

Plusieurs modules de *PlanOrdo* peuvent être assemblés pour implémenter un panel de méthodes hybrides basées sur divers modèles hybrides. Il est à noter que les méthodes hybrides implémentées peuvent être utilisées/incorporées au sein de la plate-forme *PlanOrdo*. Elles peuvent également être utilisées de manière autonome ou encore intégrées au sein des logiciels de l'entreprise cible.

2.2 Description de nos modèles hybrides

Dans cet article, nous nous concentrons sur deux modèles hybrides : le premier modèle, *Hybride 1*, utilise un tri lexicographique pour prendre en compte simultanément différents critères ; le second, *Hybride 2*, intègre la méthode multicritère Prométhée II. Ces modèles hybrides sont constitués d'un ensemble de méthodes sérielles et d'un modèle de simulation.

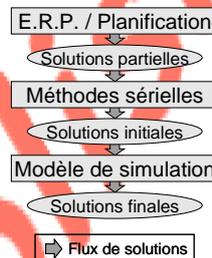


Fig. 1. Modèles Hybrides 1 et 2

Ces modèles permettent de comparer différentes méthodes sérielles sur base d'un ensemble d'indicateurs de performance. Celles-ci consistent à trier les commandes (ou les ordres de fabrications) en fonction de clefs de tri prédéfinies (basées sur les durées opératoires par exemple). En agrégeant des méthodes sérielles élémentaires telles que *SPT* (*Shortest Processing Time*) et *LPT* (*Largest Processing Time*), nous obtenons un ensemble de méthodes adaptées au type de problèmes traité. Chaque méthode sérielle fournit au modèle de simulation une solution initiale sous forme d'un vecteur de priorités, associant une priorité à chaque commande. Le modèle de simulation fournit en retour une solution « finale » (cf. figure 1). Cette solution est constituée d'une liste de commandes ordonnancées sur les postes de travail et d'un ensemble de mesures de performance. Afin de réduire le volume des résultats présentés, nous avons retenu neuf méthodes sérielles, représentatives de l'ensemble des résultats obtenus.

Dans la suite de cet article, les méthodes sérielles, suivies d'une simulation, sont appelées stratégies d'ordonnancement. Leurs résultats ont été comparés aux choix des décideurs. Dans la majorité des cas, *PlanOrdo* génère de meilleurs résultats que ceux obtenus par la personne chargée d'effectuer l'ordonnancement.

Le tri lexicographique mis en place dans l'Hybride 1 peut paraître suffisant tant qu'il est possible de classer strictement les critères à optimiser. Or, il est rarement facile/réaliste de classer les critères dans le cadre d'un problème réel ; mais surtout, lors de la comparaison de deux stratégies d'ordonnancement, un décideur accepte bien souvent une solution qui est moins intéressante du point de vue d'un critère principal (tel que le nombre de commandes en retard dans le cadre de notre étude) si cette solution offre des améliorations significatives sur une majorité d'autres critères. De ce fait, la classification des stratégies d'ordonnancement selon un ensemble de critères de performance est loin d'être triviale, surtout en présence de critères antagonistes de même importance aux yeux des décideurs. Ce constat nous a motivé dans le choix d'utiliser une méthode multicritère au sein de nos hybrides. Par conséquent, notre second modèle hybride, *Hybride 2*, est composé d'un ensemble de méthodes sérielles, d'un modèle de simulation et d'une méthode multicritère. Cette dernière est utilisée pour comparer et trier les stratégies d'ordonnancement en fonction des critères de performance sélectionnés par le décideur. Une des versions de cette méthode, Prométhée II va nous permettre d'ordonner les neuf stratégies présentées de la meilleure à la moins bonne. Prométhée II² est une méthode d'agrégation partielle qui compare les stratégies paire par paire tout en tenant compte des préférences du décideur. Le décideur exprime ses préférences en nous donnant des informations sur l'importance relative des critères ainsi qu'une fonction de préfé-

² Le site <http://www.promethee-gaia.com> est dédié aux méthodes « Prométhée ».

rence associée à chaque critère. Pour plus de détails sur cette méthode, consulter [3, 4, 18]. Il sera, par la suite, possible d'affiner la définition des poids associés à chaque critère et de guider au mieux le décideur dans le choix de la stratégie d'ordonnancement à appliquer.

Des travaux antérieurs, traitant de l'intégration de Prométhée II au sein de divers outils ont d'ores et déjà été publiés [7, 19], mais à notre connaissance c'est la première fois qu'un modèle hybride intégrant la simulation, l'optimisation d'un problème d'ordonnancement semi-continu hautement contraint et une méthode multicritère est présenté.

Après avoir défini l'objectif et la constitution de notre plate-forme, la section suivante décrit le problème industriel relatif à l'entreprise Fontainunion.

3 Problème industriel considéré

La validation de notre démarche est effectuée sur le problème d'ordonnancement du système de production de l'entreprise Fontainunion (située à Fontaine-Lévêque, en Belgique). Sa production est composée de fils et de torons d'acier de haute qualité, utilisés dans le monde entier, dans des constructions diverses (aéroports, stades, hôtels, ponts...). Signalons que *PlanOrdo* est implantée au sein de son processus de décision. Le système de production considéré est apparenté à un jobshop généralisé composé de dix-sept postes de travail (cf. figure 2).

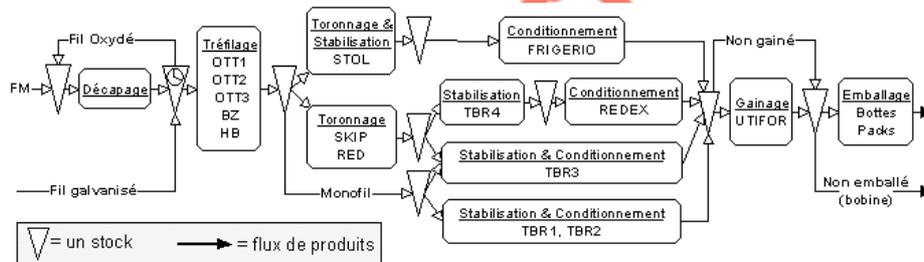


Fig. 2. Processus de fabrication « Fontainunion »

Dans une organisation de type jobshop, chaque produit passe sur les postes selon un chemin prédéfini qui lui est propre. Dans un jobshop simple [5, 15], à chaque produit correspond exactement un chemin et chaque étape du processus ne peut être effectuée que sur un seul poste. Un jobshop généralisé est un jobshop dans lequel au moins une étape du processus peut être réalisée sur plus d'un poste et/ou au moins un produit peut emprunter plus d'un chemin. Le processus de production comporte sept groupes de machines, associés aux étapes du processus de fabrication : décapage, tréfilage, toronnage, stabilisation, conditionnement, gainage, emballage. Dans le processus étudié, les opérations continues et discrètes s'enchaînent via respectivement des opérations de soudure ou de découpe en vue du stockage sur des bobines. Ainsi le tréfilage, le toronnage et la stabilisation correspondent à des sous-systèmes continus. Toutefois, la partie continue du problème est facilement modélisable à l'aide d'équations mathématiques simples. De ce fait, le simulateur RAO [2] est utilisé pour modéliser la totalité du problème.

La production est divisée en quatre grandes familles : monofils, petits, moyens et gros torons (câbles d'acier constitués de 2, 3 ou 7 fils). Ces produits sont obtenus à partir de fils machine (FM) ou de fils galvanisés (cf. figure 2). Chaque produit est le résultat d'une séquence d'opérations ordonnancées en respectant les contraintes liées aux ressources et aux relations de précedence. Les contraintes liées aux ressources incluent des limitations au niveau des entrées/sorties, des *setups*, et de préemption (une opération ne peut être stoppée pour en démarrer une autre). Les relations de précedence imposent qu'une opération ne peut commencer avant la fin de toutes les opérations précédentes, identifiées dans la gamme opératoire de chaque produit. L'hétérogénéité des machines implique que le temps opératoire dépend à la fois du produit et de la machine utilisée pour réaliser chaque opération. Enfin, la production de l'entreprise cible est de type « fabrication sur commande ». Il faut tenir compte des fortes variations des commandes d'un mois à l'autre.

Dans ce processus, différents types de *setups* doivent être pris en considération (dépendant et indépendant de la séquence de réalisation des produits sur les postes, proportionnels au tonnage réalisé). De nombreuses contraintes additionnelles rendent ce problème très difficile à appréhender en termes de modélisation, d'optimisation et de simulation. Parmi celles-ci figurent l'utilisation de ressources auxiliaires en nombre limité (bobines utilisées pour supporter les produits semi-finis), les contraintes sur les diamètres maximum/minimum et les charges maximales en entrée/sortie des postes de travail. L'hétérogénéité de ces derniers implique que toutes

les bobines ne sont pas compatibles avec toutes les machines. De même, toutes les machines ne sont pas capables de réaliser tous les produits et/ou tous les types de conditionnements. Mentionnons également qu'un sous-ensemble de commandes ne peut pas être en retard (notamment à cause des moyens de transport utilisés pour certaines d'entre-elles). Le modèle réalisé doit également reproduire et/ou anticiper, dans la mesure du possible, les dysfonctionnements du processus telles que les ruptures de fils. Lorsque la flexibilité des lignes est mise en exergue, la stratégie doit garder des bobines vides en réserve afin d'autoriser l'insertion de commandes imprévues/urgentes. Les problèmes liés au stockage et au transport au sein de l'entreprise ne sont pas pris en compte dans notre étude car ils n'ont aucun impact significatif sur le processus de fabrication étudié. Le site travaille 24 heures sur 24, cinq jours sur sept à raison de trois *pauses* par jour (une pause est une période de travail de huit heures à laquelle sont affectés onze ouvriers). Il est à noter que la mise au point d'un modèle de simulation prenant en compte l'ensemble des contraintes susnommées a nécessité plus d'un an. Cependant, afin de confronter rapidement les résultats du modèle de simulation aux résultats issus du système réel, nous avons procédé par enrichissements et optimisations successifs en affinant le modèle de manière incrémentale. Le modèle de simulation comporte des optimisations à divers niveaux (mécanisme d'agrégation, gestion des ressources auxiliaires...) situés hors du cadre de cet article.

Dans les paragraphes suivants, les résultats de neuf stratégies d'ordonnancement sont présentés. De manière à comparer et « trier » ces stratégies sur base d'un certain nombre de critères antagonistes, *PlanOrdo* comporte une implémentation de la méthode multicritère Prométhée II.

4 Résultats expérimentaux

Afin de respecter les clauses de confidentialité relatives à ce projet, les comparaisons directes entre la production réelle et la production simulée ne sont pas présentées.

L'objectif de cette section est double : il s'agit dans un premier temps de montrer expérimentalement que l'intégration de la méthode multicritère permet d'obtenir des résultats similaires aux résultats obtenus par un tri lexicographique. En effet, dans un contexte industriel, rien ne vaut une comparaison directe entre méthodes sur le système de production cible pour convaincre les décideurs de l'efficacité des méthodes. Si le besoin s'en fait sentir, une démonstration *formelle* de cette similitude entre les méthodes viendra étayer les résultats expérimentaux. Dans cet article, nous comparons les Hybrides 1 et 2 sur une même période. Sur cette période, la durée d'exécution de notre modèle de simulation varie de trois à six secondes (sur un Pentium IV 1.5GHz) en fonction du nombre de commandes et des statistiques calculées en cours de simulation. Dans un second temps, il s'agit de montrer que l'Hybride 2 offre des possibilités bien supérieures à l'Hybride 1 en terme de nuances dans le classement des stratégies.

Afin d'illustrer les possibilités offertes par la méthode multicritère dans ce contexte industriel, les paragraphes suivants présentent un exemple d'utilisation de *PlanOrdo* où 134 commandes sont simulées sur une période d'un mois. Les tableaux présentés dans cette section proposent plusieurs comparaisons des stratégies d'ordonnancement, classées selon cinq critères³ via un tri lexicographique pour l'Hybride 1 ou via Prométhée pour l'Hybride 2 :

1. Minimiser le nombre de commandes en retard N_T ;
2. Minimiser le retard moyen T ;
3. Minimiser le *makespan* C_{max} ;
4. Maximiser l'avance moyenne E ;
5. Minimiser la durée de pénurie de bobines B .

Les impératifs de l'entreprise étudiée nous imposent de considérer les critères 1 à 4 dans un ordre croissant d'importance. Le critère 5, quant à lui, doit avoir une importance inférieure au critère 2. Les notations $N_T > T > C_{max} > E$ et $T > B$ synthétisent ces contraintes.

³ Ces critères ont été choisis en accord avec les décideurs, mais *PlanOrdo* n'est pas limité à ces derniers.

Dans les paragraphes suivants, nous évaluons les différentes configurations possibles du classement des critères, à savoir :

- $N_T > T > C_{\max} > E > B$ réalisée par l'Hybride 1.1 ;
- $N_T > T > C_{\max} > B > E$ réalisée par l'Hybride 1.2 ;
- $N_T > T > B > C_{\max} > E$ réalisée par l'Hybride 1.3 ;
- $N_T > T > C_{\max} > E = B$ réalisée par l'Hybride 2.1 ;
- $N_T > T > C_{\max} = B > E$ réalisée par l'Hybride 2.2.

Dans cette notation, $E = B$ signifie que le décideur accorde la même importance aux critères E et B . De ce fait, en l'absence d'un classement strict entre les critères, le recours à l'Hybride 2 s'impose.

Les valeurs des critères T , C_{\max} , E et B sont exprimées en heures. Il est à noter que les meilleures solutions fournies par l'ensemble des hybrides implémentés ne comportent aucun retard (N_T et T sont nuls pour les premières stratégies). Par conséquent, nous ne reviendrons pas sur les valeurs de ces critères lors de l'analyse des différents classements des stratégies d'ordonnement.

4.1 Résultats de l'Hybride 1

Les résultats de l'Hybride 1 ont été comparés à la réalité. Il obtient des résultats supérieurs ou similaires aux résultats obtenus par le responsable de la production (en terme de délais, de *makespan* et de pénurie de bobines). Le tableau 1 présente une comparaison des solutions générées par l'Hybride 1 pour la période sélectionnée. Chaque solution est identifiée par un numéro interne désignant la méthode sérielle utilisée pour engendrer la solution initiale relative à la stratégie d'ordonnement courante.

Tableau 1. Classement fourni par l'Hybride 1.1 de configuration $N_T > T > C_{\max} > E > B$

N°	N_T	T	C_{\max}	E	B
1	0	0	753,90	271,50	3,17
2	0	0	757,71	277,40	1,11
6	0	0	757,71	277,15	1,09
3	0	0	760,17	256,84	3,14
7	0	0	760,17	256,83	3,15
4	2	17,65	749,77	287,42	0,52
8	3	23,09	750,80	288,62	0,40
9	4	17,08	754,08	259,82	2,93
5	6	10,55	756,68	266,57	3,33

Sur la période analysée, pour les critères retenus, la meilleure stratégie d'ordonnement est la stratégie 1. Cependant, cette stratégie génère une pénurie de bobines de 3,17 heures engendrant un arrêt partiel voire total des lignes de production. Afin d'éviter cette situation, affectons au critère B un poids intermédiaire situé entre les poids associés aux critères C_{\max} et E . Les résultats obtenus à l'issue du tri lexicographique sont présentés dans le tableau 2). Les colonnes de ce dernier ont été réordonnées pour illustrer l'ordre de tri effectué (du critère N_T au critère E). Nous constatons que la stratégie la plus efficace reste la stratégie 1.

Tableau 2. Classement fourni par l'Hybride 1.2 de configuration $N_T > T > C_{\max} > B > E$

N°	N_T	T	C_{\max}	B	E
1	0	0	753,90	3,17	271,50
6	0	0	757,71	1,09	277,15
2	0	0	757,71	1,11	277,40
3	0	0	760,17	3,14	256,84
7	0	0	760,17	3,15	256,83
4	2	17,65	749,77	0,52	287,42
8	3	23,09	750,80	0,40	288,62
9	4	17,08	754,08	2,93	259,82
5	6	10,55	756,68	3,33	266,57

Si nous renforçons encore l'impact du critère B en lui affectant un poids plus important que les poids des critères E et C_{\max} , la stratégie 1 est reléguée à la cinquième position alors que la stratégie 6 arrive en tête (cf. tableau 3).

Tableau 3. Classement fourni par l'Hybride 1.3 de configuration $N_T > T > B > C_{\max} > E$

N°	N_T	T	B	C_{\max}	E
6	0	0	1,09	757,71	277,15
2	0	0	1,11	757,71	277,40
3	0	0	3,14	760,17	256,84
7	0	0	3,15	760,17	256,83
1	0	0	3,17	753,90	271,50
4	2	17,65	0,52	749,77	287,42
8	3	23,09	0,40	750,80	288,62
9	4	17,08	2,93	754,08	259,82
5	6	10,55	3,33	756,68	266,57

Par rapport à la meilleure stratégie obtenue par l'Hybride 1.1, cette réorganisation des critères a pour impact :

- un gain de 2,08 heures sur le critère B ;
- une perte de 3,81 heures sur le critère C_{\max} ;
- un gain de 5,65 heures sur le critère E .

Ces résultats montrent que l'amélioration du critère B passe par la détérioration du critère C_{\max} .

Comme nous l'avons illustré dans les trois exemples de classement ci-dessus, privilégier un critère par rapport à un autre a un impact plus ou moins fort sur le choix de la stratégie d'ordonnancement à appliquer. L'utilisation d'un tri lexicographique engendre un classement sans possibilité d'introduire une nuance au niveau de l'importance relative des critères impliqués dans le tri des stratégies.

4.2 Résultats de l'Hybride 2

Les résultats de l'Hybride 1 illustrent parfaitement les conséquences d'un classement effectué via un tri lexicographique : un gain minime sur un critère peut entraîner des pertes plus ou moins importantes sur d'autres critères de poids plus faibles. Le problème vient de l'impossibilité d'intégrer des nuances dans le tri lexicographique, à la manière du décideur qui favorisera une solution dégradant légèrement un critère important si elle apporte des gains significatifs sur les autres critères. De même, le simulateur calcule des durées opératoires à la seconde près alors que dans le processus de fabrication réel, les temps opératoires varient toujours dans une certaine mesure (notamment à cause des interventions des opérateurs). Par conséquent, il serait souhaitable d'intégrer, dans notre cas d'étude, une demi-heure « d'indifférence » sur les critères mesurés en heures, de même qu'il serait souhaitable d'ajouter une certaine « tolérance » (fixée – par exemple – à un quart de pause, soit deux heures) lors de la comparaison des critères. De plus, il est fréquent de mettre sur un pied d'égalité plusieurs critères plus ou moins antagonistes (B et E par exemple). En ce qui concerne l'avance moyenne, cette dernière n'est véritablement significative que si l'on gagne au moins une demi-pause (soit quatre heures) entre deux solutions comparées. En outre, si deux solutions comportent au moins huit heures de différence sur le *makespan*, cette dernière est considérée comme significative. Elle représente en effet huit heures de travail pour une équipe de onze ouvriers. La méthode Prométhée permet d'intégrer ces notions très facilement par l'introduction de fonction de préférence associée à chaque critère (cf. tableaux 4 et 5).

Tableau 4. Classement fourni par l'Hybride 2.1 de configuration $N_T > T > C_{max} > E = B$

N°	N_T	T	C_{max}	B	E
2	0	0	757,71	1,11	277,40
6	0	0	757,71	1,09	277,15
1	0	0	753,90	3,17	271,50
7	0	0	760,17	3,15	256,83
3	0	0	760,17	3,14	256,84
4	2	17,65	749,77	0,52	287,42
8	3	23,09	750,80	0,40	288,62
9	4	17,08	754,08	2,93	259,82
5	6	10,55	756,68	3,33	266,57

La comparaison des premières stratégies obtenues par les Hybride 1.1 et Hybride 1.2 à celle fournie par l'Hybride 2.1 montre que nous obtenons :

- une perte de 3,81 heures sur C_{max} ;
- un gain de 5,90 heures sur E ;
- un gain de 2,06 heures sur B .

Pour la période simulée, sans introduire de retard sur l'ensemble des commandes (N_T et T sont nuls pour les premières stratégies), une augmentation de près de quatre heures sur la durée de production de l'ensemble des commandes (C_{max}) conduit à un meilleur équilibrage de la production. Ceci entraîne un gain de près de six heures sur l'avance moyenne E des commandes (par rapport à leur date d'exigibilité), et à une réduction d'un peu plus de deux heures des pénuries de bobines B .

La comparaison de la première stratégie obtenue par l'Hybride 1.3 à celle fournie par l'Hybride 2.1 montre que nous obtenons :

- un gain nul sur le critère C_{max} ;
- une perte de 0,25 heures sur E (soit quinze minutes) ;
- un gain de 0,02 heures sur B (soit un peu plus d'une minute).

Autrement dit, un gain d'un peu plus d'une minute sur le critère B , entraîne une perte de quinze minutes sur le critère E , ce qui, dans certaines entreprises, peut avoir un impact non négligeable sur les coûts de production.

Lorsque nous accordons un poids identique aux critères B et C_{max} , nous obtenons le classement présenté dans le tableau 5. La stratégie 6 se révèle la plus performante tout comme pour l'Hybride 1.3, nous ne détaillons donc pas davantage les résultats de l'Hybride 2.2 .

Tableau 5. Classement fourni par l'Hybride 2.2 de configuration $N_T > T > C_{max} = B > E$

N°	N_T	T	B	C_{max}	E
6	0	0	1,09	757,71	277,15
2	0	0	1,11	757,71	277,40
1	0	0	3,17	753,90	271,50
7	0	0	3,15	760,17	256,83
3	0	0	3,14	760,17	256,84
4	2	17,65	0,52	749,77	287,42
8	3	23,09	0,40	750,80	288,62
9	4	17,08	2,93	754,08	259,82
5	6	10,55	3,33	756,68	266,57

Les relations de dominance existant entre les meilleures stratégies fournies par les différents hybrides sont mises en évidence dans la figure 3. Un graphe illustrant les dominances par critère est utilisé pour synthétiser les résultats obtenus. Les arcs de ce graphe symbolisent les relations suivantes :

- pour le critère C_{max} , la stratégie 1 domine les stratégies 2 et 6, équivalentes du point de vue de ce critère ;
- pour le critère B , la stratégie 6 domine la stratégie 2 qui domine elle-même la stratégie 1 ;
- pour le critère E , la stratégie 2 domine la stratégie 6 qui, à son tour, domine la stratégie 1.

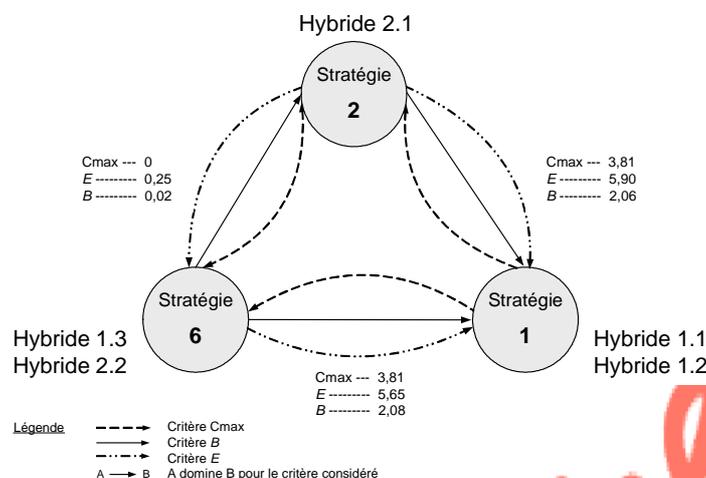


Fig.3. Comparaison des meilleures stratégies engendrées par les hybrides

L'analyse détaillée de ces résultats expérimentaux montre que le classement de stratégies d'ordonnement en fonction d'un ensemble de critères opérationnels plus ou moins antagonistes est loin d'être trivial. Ceci est encore plus vrai lorsque nous introduisons des critères liés à d'autres « vues » de l'outil de production (prise en compte de la maintenance de l'outil de production, aspects « qualité » des produits, aspects financiers, aspects commerciaux...). L'intégration d'une méthode multicritère permet non seulement aux décideurs de prendre en compte ces différents critères, mais également de disposer d'outils complémentaires permettant d'influer sur les choix des stratégies à appliquer en fonction du contexte économique.

Compte tenu de la forte variabilité des commandes dans l'entreprise cible, les classements présentés, relatifs à la période sélectionnée, ne sont pas généralisables directement à d'autres périodes. Ceci est dû au manque de stabilité des méthodes sérielles dans ce contexte. Ces résultats dépendent également des poids associés aux critères retenus/optimisés. Mais leur impact sur le classement des solutions peut être déterminé via une analyse de sensibilité [4].

5 Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous avons présenté une approche de simulation et d'optimisation d'un problème d'ordonnement concret. Pour ce faire, le processus de fabrication a été décrit en insistant sur la prise en considération simultanée de plusieurs critères opérationnels. L'utilisation d'une méthode multicritère est induite par les problèmes industriels auxquels s'adresse la plate-forme *PlanOrdo*. En effet, lors de la comparaison de deux stratégies d'ordonnement, un décideur accepte volontiers une solution associée à une dégradation d'un indicateur de performance si cette dernière apporte des gains significatifs sur plusieurs autres indicateurs de performance.

Grâce à l'intégration de *PlanOrdo* au sein du processus de décision de l'entreprise Fontainunion nous avons pu collecter bon nombre d'informations destinées à mettre au point, implémenter, évaluer et améliorer nos méthodes. L'avantage incontestable de *PlanOrdo* est de proposer rapidement aux décideurs un classement de solutions adapté au contexte économique. Au sein de *PlanOrdo*, celui-ci est traduit par l'importance relative accordée aux différents critères considérés par le biais de poids et de seuils fournis à la méthode Prométhée II. Il est possible de tester facilement l'impact de la prise en compte de critères supplémentaires en comparant les résultats obtenus avec/sans ces critères. Le choix des critères considérés ainsi que leur importance relative reste du ressort des décideurs. Il existe cependant des méthodes de pondération utilisables en complément des méthodes Prométhée pour guider les décideurs. Il est bien évidemment possible de tester divers scénarios sur des périodes de simulation plus ou moins longues (l'étendue de la période simulée n'est limitée que par la disponibilité des données dans l'entreprise et par la durée d'exécution du modèle de simulation) en vue de leur application au système de production.

Nous avons testé le comportement de nos méthodes hybrides sur plusieurs périodes et comparé les résultats des différentes stratégies d'ordonnancement. Les résultats obtenus sont en accord avec les objectifs des décideurs. Les résultats sont consistants et montrent la robustesse de la plate-forme et des modèles sous-jacents. Résolument *génériques*, l'approche proposée et la plate-forme qui en résulte ne sont pas restreintes au « problème Fontainunion ».

Au-delà du calcul rapide d'un ensemble de solutions de bonne qualité (en comparaison des solutions engendrées par la personne chargée de l'ordonnancement), l'un des points forts de la plate-forme est de fournir simultanément un large panel de critères de comparaison tout en offrant une aide significative aux décideurs. Il est envisagé d'y intégrer d'autres aspects tels que le caractère stochastique du processus simulé, la maintenance avec les notions de fiabilité et de risque, la gestion des coûts de production... Pour ce faire, le développement du module multicritère se poursuit afin de transformer la plate-forme en un véritable outil d'aide à la décision multicritère. Dans sa version finale, il sera secondé par un module chargé de la synthèse des indicateurs de performance sous forme de tableaux de bord.

Remerciements

Cette recherche a été financée par la Région Wallonne et le Fond Social Européen. Les auteurs remercient le personnel de l'Entreprise Fontainunion.

Références

2. Artiba A., Emelyanov V., et Iassinovski S.: Introduction to Intelligent Simulation: The RAO Language. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0792381769 (1998)
3. Brans J.P. et Mareschal B. : PROMÉTHÉE-GAIA: Une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples. Éditions Ellipses, ISBN 2729812539 (2002)
4. Brans, J.P. et Mareschal, B.: PROMCALC & GAIA: A new decision support system for multicriteria decision aid. Decision Support Systems, 12, pp.297-310 (1994)
5. Carlier J. and Chrétienne P. : Problèmes d'ordonnancement, modélisation, complexité, algorithmes. Masson, ISBN 2225812756 (1988)
6. Dhaevers V., Duvivier D., Roux O. et Artiba A. : Intégration de l'Optimisation et de la Simulation en Industrie Semi-Continue. In Proc. of MOSIM'04, vol. 2, pp. 601-608, ISBN 2743007311 (2004)
7. De Lit P., Latinne P., Rekiek B. et Delchambre A.: An ordering genetic algorithm for assembly planning. IJPR (2001)
11. Duvivier D., Dhaevers V., Bachelet B. et Artiba A.: Integrating simulation and optimization of Manufacturing systems. IEEE SMC, part C: Applications and reviews, 33(2):186-192, ISSN 10946977 (2003)
12. Hansmann K.-W. et Hoeck M.: Production control of a flexible manufacturing system in a job shop environment. ITOR, 4(5/6):341-351, ISSN 09696016 (1997)
14. Iassinovski S., Artiba A., Bachelet V. et Riane F.: Integration of simulation and optimization for solving complex decision making problems. IJPE, 85(1):3-10 (2003)
15. Jain A. et Meeran S.: Deterministic job-shop scheduling: past, present and future. EJOR, 113:390-434 (1999)
17. Pichel D., Dontaine A., Iassinovski S., Artiba A. et Fagnart C. : ALIX : une méthode de modélisation des flux d'un système de production. Conf. CPI 2003, Maroc (2003)
18. Pomerol, J-C. et Barba-Romero, S.: Multicriterion decision making in management: Principles and practice. Kluwer, New York (2000)
19. Rekiek B.: Assembly Line Design multiple objective grouping genetic algorithm and the balancing of mixed-model hybrid assembly line. PhD thesis, Université Libre de Bruxelles, Belgique (2001)
20. Riane F., Artiba A. et Iassinovski S.: An integrated production planning and scheduling system for hybrid flowshop organizations. IJPE, 74 pp.33-48 (2001)
21. Smith M.L. et Seidmann A.: Due date selection procedures for job-shop simulation. Computers and Industrial Engineering Journal, 7(3):199-207 (1983).
23. Waikar A. M., Sarker B. R. et Lal A. M.: A comparative study of some priority dispatching rules under different shop loads. Production Planning Control, 6(4):301-310, ISSN 09537287 (1995)
27. J.E. Beasley. OR-Library: Distributing test problems by electronic mail. Journal of the Operational Research Society, 41:1069--1072, 1990. available via <http://www.brunel.ac.uk/depts/ma/research/jeb/info.html>