

Classement multicritère de stratégies d'ordonnancement : Cas d'une industrie semi-continue

V. Dhaevers, D. Duvivier, O. Roux, N. Meskens et A. Artiba

Résumé— Cet article porte sur l'aide à la décision dans le cadre de l'ordonnancement 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'ordonnancement 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. Cette étude compare et classe, sur base d'un ensemble d'indicateurs de performance, plusieurs stratégies d'ordonnancement au moyen d'une méthode lexicographique d'une part et de la méthode multicritère *Prométhée* d'autre part.

Mots-clés— Aide à la décision, industrie semi-continue, méthode multicritère, ordonnancement, simulation.

I. 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 de problèmes de planification et d'ordonnancement [4]. Celle-ci repose sur plusieurs modèles hybrides combinant la simulation avec différentes méthodes d'optimisation. Le modèle de simulation est conçu de manière à tenir compte des moindres détails de fonctionnement du processus de production sous-jacent. Cette plate-forme, nommée *PlanOrdo*, est composée de modules réutilisables, organisés autour d'une base de données. Le module dédié à l'ordonnancement comporte un ensemble de méthodes sérielles classiques telles que SPT (*Shortest Processing Time*), LPT (*Largest Processing Time*)... ainsi que des méthodes sérielles spécifiques. Les ordonnancements fournis par ce module peuvent être améliorés par le module d'optimisation au moyen notamment de méthodes telles que les méta-heuristiques ou les méthodes exactes.

Dans le cadre de cette recherche, notre plate-forme fournit un « banc d'essai » pour comparer différentes stratégies

d'ordonnancement 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'ordonnancement 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.

La nécessité de générer des solutions offrant de bons compromis entre les objectifs bien souvent antagonistes de l'entreprise nous a amenés à intégrer une méthode multicritère au sein de notre plate-forme.

Notre étude synthétise les résultats de l'application de la plate-forme dans une entreprise ayant un système de production semi-continu fortement contraint [5] : l'entreprise Fontainunion. Outre son aspect pluridisciplinaire, l'une des originalités de notre recherche réside dans la prise en compte de la gestion des ressources auxiliaires.

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

II. PLATE-FORME *PLANORDO*

PlanOrdo est une plate-forme « générique » centrée sur la simulation et l'optimisation des problèmes de planification et d'ordonnancement de types discrets ou semi-continus. Dans le contexte de l'étude présentée, la généralisation de nos résultats s'applique aux problèmes d'ordonnancement de type jobshop généralisé (jobshop dans lequel au moins une étape du processus de production peut être réalisée sur plus d'un poste et/ou au moins un produit peut emprunter plus d'un chemin). 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.

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

V. Dhaevers, D. Duvivier, O. Roux et N. Meskens travaillent aux Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgique (e-mail : {dhaevers, duvivier, roux, meskens}@fucam.ac.be).

A. Artiba est professeur à l'École de Technologie Supérieure, Montréal, Canada (e-mail : hakim.artiba@etsmtl.ca).

A. Description

La plate-forme, conçue sous forme de modules réutilisables, est organisée autour d'une base de données. Cette organisation extrêmement souple permet d'intégrer un grand nombre d'outils complémentaires afin de fournir au décideur une aide à la décision aussi complète, précise et fiable que possible.

L'interface graphique de *PlanOrdo* pilote un certain nombre de modules. Le module d'ordonnancement comporte un panel de méthodes sérielles classiques et spécifiques. Afin de pallier les faiblesses caractéristiques de ces méthodes [4, 7, 10, 11], les ordonnancements fournis par ce module peuvent être améliorés par le module d'optimisation. Ce dernier prend plusieurs formes : un classement multicritère dans le cas où seules les méthodes sérielles sont utilisées ou une méthode d'optimisation (méta-heuristique ou méthode exacte) suivie d'un classement multicritère dans le cas général [5, 6]. D'autres modules existent dans *PlanOrdo*, cependant ces derniers sont hors du contexte de cet article.

Le coeur de la plate-forme est constitué d'un modèle de simulation. Celui-ci, développé dans le langage de notre simulateur *RAO* [1], est composé de *patterns* génériques décrivant le fonctionnement des ressources standards. Ce modèle peut éventuellement être complété, au moyen de notre modélisation graphique *ALIX* [8], d'un petit nombre de *patterns* dédiés au problème étudié.

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

B. 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 de classement ; le second, *Hybride 2*, intègre la méthode multicritère Prométhée II. Ces modèles hybrides sont constitués de méthodes sérielles et d'un modèle de simulation. Ils permettent de comparer les résultats des différentes méthodes sérielles sur base d'un ensemble d'indicateurs de performance sélectionnés par le décideur. Les méthodes sérielles implémentées dans la plate-forme sont des méthodes sérielles élémentaires ou des méthodes résultant d'une combinaison de ces méthodes sérielles. Chacune d'elle fournit au modèle de simulation une solution initiale sous forme d'un vecteur de priorités, associant une priorité à chaque commande en fonction de clefs de tri prédéfinies (basées sur les durées opératoires par exemple). Le modèle de simulation fournit en retour une solution « finale », 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.

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 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 si cette solution offre des améliorations significatives sur une majorité d'autres critères. De ce fait, le classement des stratégies d'ordonnancement selon plusieurs 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 poussé à implémenter une méthode multicritère au sein de la plate-forme.

Notre second modèle hybride, *Hybride 2*, est composé d'un ensemble de méthodes sérielles, d'un modèle de simulation et de la méthode multicritère Prométhée II. Cette dernière est une méthode d'agrégation partielle qui compare les stratégies paire par paire tout en tenant compte des préférences du décideur. Celles-ci s'expriment en termes d'informations sur l'importance relative des critères et sur la fonction de préférence associée à chaque critère [2, 3, 9]. Une analyse de sensibilité permettra, par la suite, d'affiner la définition des poids associés à chaque critère [3] et de guider au mieux le décideur dans le choix de la stratégie d'ordonnancement à appliquer.

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

III. PROBLEME INDUSTRIEL CONSIDERE

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 (câbles constitués de 2, 3 ou 7 fils), utilisés dans le monde entier, dans des constructions diverses telles que les aéroports, les stades, les ponts... Le système de production considéré est apparenté à un jobshop généralisé composé de dix-sept postes de travail (cf. figure 1).

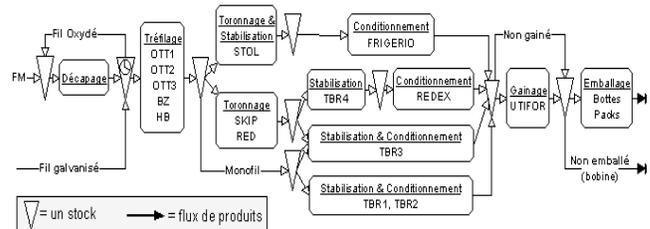


Fig. 1. Processus de fabrication de l'entreprise Fontainunion

Le processus de production comporte sept groupes de machines, associés aux étapes du processus de fabrication. Les opérations continues et discrètes s'enchaînent via respectivement des opérations de soudure ou de découpe en

vue du stockage des produits semi-finis sur des bobines. La partie continue du problème étant facilement modélisable à l'aide d'équations mathématiques simples, le simulateur RAO a été utilisé pour modéliser la totalité du problème. Dans le cas contraire, il aurait été couplé à un solveur.

Chaque produit, obtenu à partir de fils machine (FM) ou de fils galvanisés (cf. figure 1), est le résultat d'une séquence d'opérations ordonnancées en respectant les contraintes liées aux ressources et aux relations de précédence. Les contraintes liées aux ressources incluent des limitations au niveau des entrées/sorties, des *setups*, et de la préemption. Les relations de précédence 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 » et nécessite la prise en compte de fortes variations des commandes d'un mois à l'autre.

Dans ce processus, différents types de *setups* doivent être pris en considération : dépendants et indépendants de la séquence de réalisation des produits sur les postes de travail, 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, figure l'utilisation de ressources auxiliaires en nombre limité (bobines), 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 accuser de retard en raison notamment des moyens de transport utilisés. Le modèle réalisé doit également reproduire et anticiper, dans la mesure du possible, les dysfonctionnements du processus tels que des 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).

Dans la section suivante, les résultats des deux hybrides sur neuf stratégies d'ordonnancement sont présentés.

IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX

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. Précisons toutefois que dans la majorité des cas, *PlanOrdo* génère de

meilleurs résultats en termes de délais, de *makespan* et de pénurie de bobines que ceux obtenus par la personne chargée de réaliser l'ordonnancement.

Dans cet article, nous comparons les performances des Hybrides 1 et 2 sur une même période. Sur cette période, la durée d'exécution de notre modèle de simulation sur un Pentium IV 1.5GHz varie de trois à six secondes. Celle-ci est fonction du nombre de commandes et des statistiques calculées en cours de simulation.

L'objectif de cette section est de montrer que l'hybride intégrant une méthode multicritère offre des possibilités supérieures à celles de l'hybride utilisant un tri lexicographique en termes de nuances dans le classement des stratégies.

Les paragraphes suivants présentent un exemple d'utilisation de *PlanOrdo* où la production de 134 commandes est simulée sur une période d'un mois. Les tableaux présentés dans cette section proposent plusieurs classements des différentes stratégies d'ordonnancement, évaluées selon les critères choisis par le décideur, *PlanOrdo* n'étant toutefois pas limitée à ces derniers. Les critères pris en compte sont :

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

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

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 les Hybrides 1.1 et 2.1 ;
- $N_T > T > C_{max} > E = B$ réalisée par l'Hybride 2.2 ;
- $N_T > T > C_{max} > B > E$ réalisée par les Hybrides 1.2 et 2.3 ;
- $N_T > T > C_{max} = B > E$ réalisée par l'Hybride 2.4 ;
- $N_T > T > B > C_{max} > E$ réalisée par les Hybrides 1.3 et 2.5.

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'ordonnancement.

A. Résultats de l'hybride 1

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 associée à la stratégie d'ordonnancement

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'ordonnancement 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. 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}	E	B
1	0	0	753,90	271,50	3,17
6	0	0	757,71	277,15	1,09
2	0	0	757,71	277,40	1,11
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

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	C _{max}	E	B
6	0	0	757,71	277,15	1,09
2	0	0	757,71	277,40	1,11
3	0	0	760,17	256,84	3,14
7	0	0	760,17	256,83	3,15
1	0	0	753,90	271,50	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

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 des critères B et E passe par une détérioration du critère C_{max}.

B. 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 suite aux interventions humaines.

La méthode multicritère Prométhée permet de choisir parmi six types de critères et donc d'introduire des seuils d'indifférence (q) et/ou de préférence (p). Dans cette recherche, nous avons considéré le critère N_T comme un vrai critère et les autres comme des pseudo-critères [9]. Le tableau 4 montre le paramétrage utilisé.

TABLEAU 4
PARAMETRAGE DES CRITERES SOUS PROMETHEE

	N _T	T	C _{max}	E	B
Type	vrai critère	pseudo	pseudo	pseudo	pseudo
q _i	0	0,5	4	4	0,5
p _i	0	2	8	8	2

Ce paramétrage induit que si, par exemple, deux solutions comportent au moins huit heures de différence (p=8) sur le *makespan* (C_{max}), cette dernière va entraîner la préférence d'une solution sur l'autre pour ce critère ce qui représente concrètement huit heures de travail pour une équipe de onze ouvriers. Par contre, si la différence est de moins de quatre heures (q=4), celle-ci est non significative.

Par ailleurs, la méthode multicritère, contrairement au tri lexicographique, permet de mettre sur un pied d'égalité plusieurs critères plus ou moins antagonistes (B et E par exemple).

L'interface de *PlanOrdo*, comme l'illustre la figure 2, permet au décideur de paramétrer aisément Prométhée et de définir, au moyen de curseurs, l'importance accordée à chaque critère. La visualisation de l'impact de toute modification sur la classement des stratégies d'ordonnancement est immédiate.

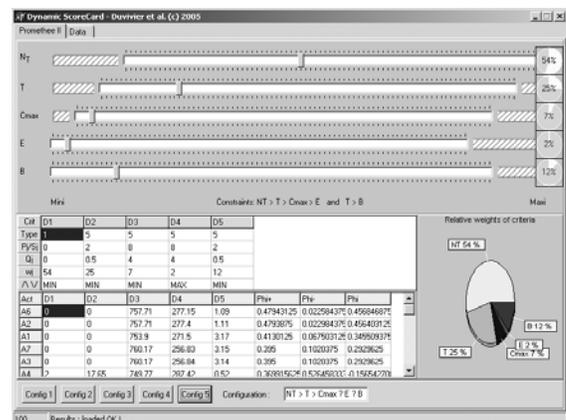


Fig. 2. Classement dynamique des stratégies d'ordonnancement via la méthode multicritère Prométhée II.

Les différents classements des stratégies d'ordonnancement

proposés par la méthode Prométhée II sont présentés dans le tableau 5.

Les classements proposés par l'Hybride 2 diffèrent de ceux obtenus au moyen du tri lexicographique. Cette différence de classement s'amenuise avec l'augmentation de l'importance accordée au critère relatif aux ressources auxiliaires (*B*), pour finalement classer en première position la stratégie 6 dans les deux hybrides.

TABLEAU 5
CLASSEMENTS DES STRATÉGIES D'ORDONNANCEMENT FOURNIS
PAR L'HYBRIDE 2

Configuration: $NT > T > C_{max} > E > B$ réalisée par l'Hybride 2.1

N°	N _T	T	C _{max}	E	B
2	0	0	757,71	277,40	1,11
6	0	0	757,71	277,15	1,09
1	0	0	753,90	271,50	3,17
7	0	0	760,17	256,83	3,15
3	0	0	760,17	256,84	3,14
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

Configuration $NT > T > C_{max} > E = B$ réalisée par l'Hybride 2.2

N°	N _T	T	C _{max}	E	B
2	0	0	757,71	277,40	1,11
6	0	0	757,71	277,15	1,09
1	0	0	753,90	271,50	3,17
7	0	0	760,17	256,83	3,15
3	0	0	760,17	256,84	3,14
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

Configuration $NT > T > C_{max} > B > E$ réalisée par l'Hybride 2.3

N°	N _T	T	C _{max}	E	B
6	0	0	757,71	277,15	1,09
2	0	0	757,71	277,40	1,11
1	0	0	753,90	271,50	3,17
7	0	0	760,17	256,83	3,15
3	0	0	760,17	256,84	3,14
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

Configuration $NT > T > C_{max} = B > E$ réalisée par l'Hybride 2.4

N°	N _T	T	C _{max}	E	B
6	0	0	757,71	277,15	1,09
2	0	0	757,71	277,40	1,11
1	0	0	753,90	271,50	3,17
7	0	0	760,17	256,83	3,15
3	0	0	760,17	256,84	3,14
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

Configuration $NT > T > B > C_{max} > E$ réalisée par l'Hybride 2.5

N°	N _T	T	C _{max}	E	B
6	0	0	757,71	277,15	1,09
2	0	0	757,71	277,40	1,11
1	0	0	753,90	271,50	3,17
7	0	0	760,17	256,83	3,15
3	0	0	760,17	256,84	3,14
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

Afin de synthétiser l'ensemble des résultats fournis par les

différents hybrides, les dominances par critère existant entre les meilleures stratégies sont mises en évidence dans la figure 3. 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.

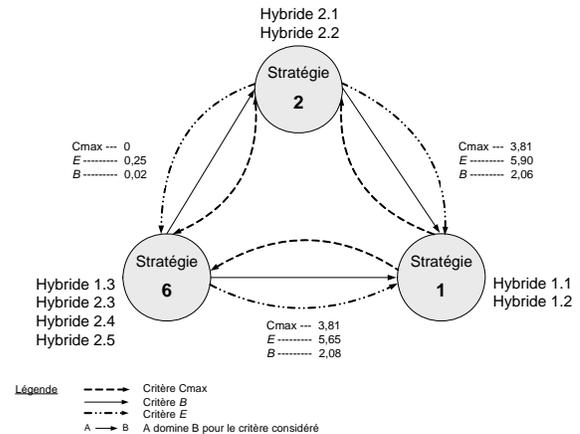


Fig. 3. Comparaison des meilleures stratégies engendrées par les hybrides

En analysant la figure 2, nous constatons qu'un gain de 5,90 heures sur E et de 2,06 heures sur B entraînera une détérioration de 3,81 heures sur C_{max} .

Par ailleurs, 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.

Au cours des différentes expérimentations effectuées sur plusieurs périodes, nous avons constaté que le classement proposé par Prométhée II privilégie des stratégies qui offrent un meilleur compromis entre les critères pris en compte.

L'analyse détaillée de ces résultats expérimentaux montre que le classement de stratégies d'ordonnancement 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 relatifs à la période sélectionnée, ne sont pas généralisables directement à d'autres périodes ce qui s'explique par le manque de stabilité des méthodes sérielles dans ce contexte. Ces résultats dépendent également des poids associés aux critères retenus. Toutefois,

leur impact sur le classement des solutions peut être déterminé via une analyse de sensibilité.

V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une approche de simulation et d'optimisation d'un problème d'ordonnancement 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'ordonnancement, 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.

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 cette plate-forme est de proposer rapidement aux décideurs un classement de solutions adapté au contexte économique. 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. 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.

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.

REFERENCES

[1] Artiba A., Emelyanov V., et Iassinovski S.: Introduction to Intelligent Simulation: The RAO Language. Kluwer Academic Publishers, ISBN 0792381769 (1998).

[2] 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).

[3] 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).

[4] Carlier J. and Chrétienne P.: Problèmes d'ordonnancement, modélisation, complexité, algorithmes. Masson, ISBN 2225812756 (1988).

[5] 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).

[6] 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).

[7] 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).

[8] 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).

[9] Pomerol, J-C. et Barba-Romero, S.: Multicriterion decision making in management: Principles and practice. Kluwer, New York (2000).

[10] Smith M.L. et Seidmann A.: Due date selection procedures for job-shop simulation. Computers and Industrial Engineering Journal, 7(3):199-207 (1983).

[11] 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).