



**HAL**  
open science

# L'analyse multicritère: une approche performante pour l'intégration de l'opérateur humain pour le pilotage réactif et distribué des systèmes de production

Damien Trentesaux

## ► To cite this version:

Damien Trentesaux. L'analyse multicritère: une approche performante pour l'intégration de l'opérateur humain pour le pilotage réactif et distribué des systèmes de production. GRP, Oct 1997, Cachan, France. hal-03225806

**HAL Id: hal-03225806**

<https://uphf.hal.science/hal-03225806v1>

Submitted on 13 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'analyse multicritère: une approche performante pour l'intégration de l'opérateur humain pour le pilotage réactif et distribué des systèmes de production

---

Damien Trentesaux

Equipe Génie Industriel et Logiciel  
Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines,  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,  
Le mont Houy, BP 311, 59304 Valenciennes cedex,  
Damien.Trentesaux@univ-valenciennes.fr

## Résumé

La complexité des systèmes de pilotage est induite par le besoin de réactivité. En effet, la capacité à réagir efficacement face à ces perturbations est de plus en plus nécessaire à la survie d'une entreprise dans un environnement fortement concurrentiel (maintien des parts du marché, respect des délais clients, etc.). Ceci requiert de modéliser de plus en plus fidèlement possible le système de production (en terme de causalités notamment). Cependant, au fur et à mesure que ce besoin croît, la complexité du système de pilotage s'accroît, et parallèlement, celles des décisions, ce qui se traduit par une diminution sensible de la structuration du problème. Une solution est alors d'intégrer l'opérateur dans le processus de pilotage, car il est le seul à pouvoir gérer un tel contexte décisionnel peu structuré.

Les algorithmes d'optimisation imposent d'établir des hypothèses qui réduisent fortement l'adéquation du modèle de décision à la réalité. Nous montrons que l'exploitation d'une approche multicritère permet à la fois d'intégrer un ensemble de contraintes spécifiques au domaine de la production induit par le besoin en réactivité, et un ensemble de contraintes spécifiques à l'opérateur. L'ensemble contribuant à l'optimisation de l'intégration de l'opérateur. Par rapport aux contraintes générales fixées par le pilotage, nous établissons l'intérêt d'une méthode multicritère particulière: Prométhée.

Pour illustrer notre proposition, nous montrons qu'une telle approche est compatible avec le pilotage distribué d'un système de production en élaborant puis évaluant l'impact d'une liste de critères sur le respect des objectifs globaux.

## Introduction

Cet article s'insère dans la continuité des travaux exposés au GRP de Lyon et de Bordeaux. L'exposé de Lyon avait pour objet de caractériser la complexité des systèmes manufacturiers et de justifier le besoin de réactivité au niveau du pilotage de tels systèmes. Cette étude a montré que l'opérateur humain doit être nécessairement intégré au processus de pilotage. Cependant, une telle intégration entraîne de nombreuses contraintes, tant au niveau de l'opérateur (contraintes psychologiques) qu'au niveau du pilotage même (complexité du système de pilotage et du système piloté). Les résultats de l'analyse sur l'optimisation de la coopération, prenant en compte l'ensemble de ces contraintes, nous ont amené à considérer comme premier cas d'étude la notion "d'interface avancée". Une des perspectives envisagées concernait l'exploitation des méthodes multicritères, fortement compatibles avec le cahier des charges développé à travers l'exposé réalisé. Cette approche est développée dans cet article.

Par ailleurs, l'exposé qui a eu lieu au GRP de Bordeaux avait pour objet de proposer une structure de pilotage des systèmes de production particulière (structure de pilotage égalitaire supervisée). Nous appliquons notre proposition portant sur l'aspect "processus de décision multicritère" au niveau du pilotage égalitaire supervisé.

### **1. Pilotage, complexité et réactivité**

Les travaux réalisés portent sur le pilotage des systèmes de production, c'est à dire au niveau de la gestion temps réel par opposition à la gestion prévisionnelle. Cette dernière assure l'anticipation et la programmation d'un ensemble d'actions ou de décisions pour pallier à l'inertie du système de production (délais de production, d'approvisionnement, etc.), alors que le niveau pilotage élabore les décisions et les actions qui sont réalisées en temps-réel et qui sont donc déclenchées par un ensemble d'événements liés à l'état courant du système de production.

Le pilotage doit établir constamment un compromis entre les ordres issus de la gestion prévisionnelle et les actions réellement effectuées au niveau du système de production. La problématique principale du pilotage est donc d'assurer la cohérence des décisions avec les contraintes imposées par la gestion prévisionnelle en terme de décisions ou d'objectifs et les contraintes imposées par le système physique.

La complexité des systèmes de production est mise en évidence d'une part par le nombre important, la diversité et le haut niveau de couplage entre des composants tant matériels qu'humains et d'autre part par la dynamique du système qui est soumis à des perturbations internes (fonctionnement, etc.) et externes (demande, etc.).

La complexité des systèmes de pilotage est induite par le besoin en réactivité. En effet, la capacité à réagir efficacement face à ces perturbations est de plus en plus nécessaire à la survie d'une entreprise dans un environnement fortement concurrentiel (maintien des parts du marché, respect des délais clients, etc.). Ceci requiert de modéliser de plus en plus fidèlement possible le système de production. Cependant, au fur et à mesure que ce besoin croit, la complexité du système de pilotage s'accroît, et parallèlement, celles des décisions, ce qui se traduit par une diminution sensible de la structuration des problèmes à résoudre. Une solution est alors d'intégrer l'opérateur dans le processus de pilotage, car il est le seul à pouvoir gérer un tel contexte décisionnel peu structuré [Trentesaux et al., 1997a].

### **2. Problématique de l'intégration de l'opérateur humain**

Nous avons montré qu'une telle approche contribue à l'accroissement de la robustesse du système de pilotage (respect des objectifs malgré la modification des caractéristiques du système de production) et de la capacité à rejeter les perturbations (réactivité face aux aléas internes et externes). Cependant, cette intégration dans un environnement fortement réactif et complexe n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes d'ordre psychologiques [Trentesaux et al., 1997a]:

(i) l'opérateur doit faire face à un ensemble de décisions et contextes identiques: la complexité peut induire en erreur l'opérateur car la sensibilité aux conditions initiales des systèmes de production ("effet papillon") nuit à la copie des décisions et des contextes.

(ii) l'opérateur doit prendre ses décisions dans un délai fixe difficilement chiffrable: un temps alloué pour la décision important par rapport à ce délai nuit aux performances globales du système car il retarde les décisions. Un temps faible également car la qualité des décisions prises est alors faible.

(iii) l'opérateur doit faire face à des occurrences de besoins décisionnels non maîtrisés, ce qui peut conduire où à la surcharge de travail (stress) ou au manque de travail (diminution de l'intérêt porté par l'opérateur).

(iv) l'opérateur peut difficilement développer un modèle mental des causalités des événements et des effets des décisions. Ceci induit une difficulté à traduire des objectifs implicites, à évaluer des décisions et à réagir correctement face aux aléas.

(v) l'opérateur est limité en terme de mémorisation, ce qui nuit à la gestion efficace de l'ensemble des données des systèmes complexes.

En terme de cahier des charges, ces 5 points se traduisent par les objectifs suivants [Trentesaux et al., 1997a]:

maximiser la confiance en soi de l'opérateur tout en évitant la "sur-confiance" en soi, en référence aux points (ii) et (iv).

maximiser la confiance dans le système de pilotage, en référence principalement au point (iv).

optimiser la charge mentale, en référence aux points (i), (ii), (iii) et (v).

Pour contribuer à la réalisation de ces objectifs, nous avons en premier lieu focalisé nos travaux sur "l'acquisition" des informations par l'opérateur, en proposant une "interface avancée". Nous avons montré qu'une telle approche permet d'accroître les performances globales du système de pilotage en:

diminuant le temps alloué à la compréhension d'un problème et de son contexte par l'opérateur,

augmentant la quantité et la qualité de l'information échangée entre le système de pilotage et l'opérateur.

Ces travaux font référence à la phase d'information et de conception. Ils nous permettent d'intégrer la phase d'analyse du problème (les travaux ultérieurs se consacreront à la phase d'évaluation et d'analyse des performances). Nous montrons dans la partie suivante que l'approche multicritère est une approche cohérente avec les objectifs fixés en terme:

d'objectifs cognitifs: intégration efficace de l'opérateur (maximisation de la confiance en soi et en la machine, optimisation de la charge mentale),

d'objectifs techniques: intégration de la réactivité (face aux aléas internes et externes).

Ceci nous conduira à proposer le développement de systèmes interactifs d'aide multicritère à la décision.

### **3. Pilotage et analyse multicritère**

#### *3.1. Limites des approches classiques*

Les approches classiques exploitent des algorithmes d'optimisation de recherche opérationnelle basés principalement sur les règles de production: Earliest Due Date: EDD, Shorter Production Time: SPT, etc., ou un compromis d'optimisation entre toutes ces règles. Malheureusement, cette simplification réduit fortement la réactivité car:

1. L'opérateur n'a pas sa place dans la décision, ou fort peu,

2. Les calculs sont très complexes (optimisation portant sur de nombreuses variables continues et discrètes), et sont d'autant peu efficaces que les hypothèses de travail sont fortement réductrices et que les données sont simplifiées,

3. L'intégration des contraintes fugitives de flux (commande urgente, préférence pour une machine à une autre pour raison personnelle ou professionnelle telle que respectivement l'habitude d'utilisation ou la rentabilité d'un investissement, problème de transport, etc.) est impossible,

4. L'intégration des contraintes de ressources (usure outil, capacité de stockage, temps de changement outil, re-initialisation, etc.) est très difficile, car cela accroît de manière très sensible les temps de calcul. Ceci compromet fortement la qualité de la prise de décision.

Ces points illustrent clairement le fait que ni les objectifs techniques et ni les objectifs cognitifs ne peuvent être atteints lorsque l'opérateur est intégré au système de pilotage par le seul biais d'une algorithmique d'optimisation. Après avoir présenté l'approche multicritère, nous montrons en quoi elle permet d'atteindre ces deux objectifs.

#### *3.2. L'approche multicritère*

De très nombreuses références traitent de la théorie de l'approche multicritère et de ses applications industrielles: [Schärlig, 1985], [Pomerol and Barba-Romero, 1993], [Roy, 1985], [Roy et Bouyssou, 1993], [Vincke, 1989], [Zeleny, 1982], etc. Plusieurs synthèses ont été réalisées dans le vue d'élaborer une typologie de problèmes à caractère multicritère (voir par exemple [Korhonen et al., 1992]).

Une approche multicritère a pour principe de s'appuyer sur des hypothèses proches de la réalité, et d'utiliser des méthodes de traitement de données moins complexes [Roy et Bouyssou, 1993]. L'objectif n'est plus de trouver une solution optimale, mais plutôt de proposer un compromis efficace. Ce compromis est réalisé en fonction de l'objectif de résolution qui peut-être principalement [Roy et Bouyssou, 1993]:

- élaborer un choix (problématique de choix),
- élaborer un tri par catégorie (problématique de tri),
- élaborer un classement (problématique de rangement).

Une méthode multicritère se fonde sur la notion de "matrice de décision" qui comporte le maximum d'information nécessaire au traitement. Elle est élaborée à partir d'un ensemble de choix potentiels (alternatives). Chacun de ces choix est évalué en regard d'un critère qui représente le jugement d'une réalité correspondant à un axe de signification précis. On constate qu'une première restriction a lieu, puisque la réalité est restreinte à un ensemble de critères.

Dans le cas des méthodes d'optimisation, on cherche à agréger les données (sous la forme d'un indicateur par exemple) le plus tôt possible dans le déroulement du processus de décision afin d'élaborer une relation transitive entre les différents choix. L'approche multicritère au contraire retarde le plus possible lors de la phase de résolution, l'opération d'agrégation, car cette dernière détruit l'information de base donnée par la matrice de décision. On cherche de cette manière à élaborer en premier lieu les évaluations pour chacun des critères puis à agréger ces données. Deux étapes sont alors définies.

### 3.2.1. Phase d'information

L'objectif premier de la phase d'information est d'obtenir et de structurer la matrice de décision. La difficulté inhérente à cette phase est la prise en compte de la diversité des données et des évaluations. On discerne deux grandes catégories de données:

les données quantitatives: à relation cardinale (l'ordre indiqué par cette relation est quantifiable, on peut déterminer une distance entre deux données),

les données qualitatives: relation ordinale (la mesure de la distance est impossible, seul l'ordre est disponible) ou de type linguistique.

A chaque critère correspond un type de donnée. Par exemple, la première catégorie de données donne naissance à un ensemble de critères que l'on peut subdiviser en vrai-critère, quasi-critère, pseudo-critère. Ces notions peuvent être généralisées, l'exemple le plus connu s'appuie sur les concepts de la logique floue [Fodor et Roubens, 1994].

Par ailleurs, la qualité de la prise de décision est fortement conditionnée par le choix des critères pris en considération. [Roy et Bouyssou, 1993] indique cinq conditions portant sur les critères: exhaustivité, cohésion, non-redondance, séparabilité et isolabilité.

En ce qui concerne le niveau d'importance relative des critères, le lecteur pourra se référer aux auteurs cités plus haut pour approfondir cet aspect. Les études réalisées soulignent le fait que la déclaration de l'importance relative entre critères peut-être ou non réalisée par l'intermédiaire de poids. Dans le premier cas, la cardinalisation permet d'élaborer une algorithmique plus simple que dans le second cas où l'aspect qualitatif de l'importance relative prédomine. Par ailleurs, il est clair que la spécification des différents poids est une étape très sensible et peut influencer fortement sur la décision finale.

### 3.2.2. Phase d'agrégation

En ce qui concerne la phase d'agrégation, le nombre de méthodes disponibles témoigne de la diversité des différentes approches pour effectuer l'agrégation.

Deux grandes écoles coexistent: l'école américaine et l'école européenne. La première cherche à établir un pré-ordre total des alternatives à partir de fonctions d'utilité. Une fonction d'utilité est une fonction de normalisation, croissante, permettant d'agréger (la plupart du temps de manière additive) les différentes évaluations en un critère unique. C'est une méthode d'agrégation complète et transitive qui se rapproche assez des méthodes d'optimisation.

L'école européenne favorise une méthode d'agrégation partielle ou locale et itérative. Elle estime réaliste et plus proche de la philosophie multicritère de conserver au maximum l'information et d'éviter cette agrégation totale. Cette démarche permet entre autres d'intégrer les notions d'intransitivité des préférences, d'incomparabilité entre actions, d'indifférence, de seuil de veto, etc. L'approche qui permet une agrégation partielle est celle du surclassement qui se décompose en deux étapes:

évaluation de tous les couples de choix pour chaque critère. On explicite les relations de surclassement partielles (la fonction d'utilité n'existe pas dans cette approche),

exploitation de ces relations partielles. En ce qui concerne la problématique de choix, un graphe de surclassement partiel peut être établi en fonction de ces relations. L'étape finale d'agrégation est réalisée en établissant une relation qui permet d'extraire un sous-ensemble d'alternatives possédant certaines particularités. Par exemple, Electre [Roy, 1985] utilise la notion de seuil (coupure) pour déterminer un noyau de surclassement. Le noyau est défini par les propriétés de "stabilité" et "d'absorption" dans un graphe de surclassement. La propriété de stabilité stipule que toute alternative qui ne fait pas partie du noyau est surclassée par au moins une alternative du noyau. La propriété d'absorption stipule qu'il n'existe aucun surclassement au sein de chaque couple d'alternatives du noyau. En ce qui concerne la problématique de rangement, une fonction de performance (score) établit un pré-ordre total (sans ex-aequo) ou partiel (avec ex-aequo) selon le cas. Prométhée [Brans et Vincke, 1985] utilise la notion de flux entrant ou sortant pour déterminer ces pré-ordres.

La phase d'agrégation finale n'est pas systématiquement nécessaire. En effet, il suffit parfois de n'utiliser que les surclassements partiels (qui constituent en eux-mêmes une première étape vers la décision) lorsque la quantité d'information disponible permet la compréhension globale du processus décisionnel.

Il est à noter qu'une phase d'exploitation propre peut-être définie dans le cas où l'exploitation des relations partielles est complexe [Fodor et Roubens, 1994]. C'est le cas, par exemple, lorsqu'une méthode utilise abondamment la notion de noyau (problématique de choix) pour établir un sous-ensemble d'alternatives satisfaisantes. Il est alors nécessaire de procéder à une étude complète du graphe des relations afin de pouvoir extraire un unique noyau. La difficulté intervient lorsque ce graphe est cyclique où plusieurs noyaux (voire aucun) peuvent coexister.

L'approche multicritère possède une potentialité élevée en terme de paramétrage. Ces paramétrages concernent outre les différents poids (s'ils sont définis par la méthode), les seuils de veto, des pseudo critères, des quasi critères, des seuils de surclassement, etc. L'effet pervers d'une telle approche est bien sûr le danger de déplacer le problème de la décision en un problème de définition des paramètres. Inversement, il est possible de calculer le paramétrage suffisant pour obtenir un choix particulier. Ce qui n'est pas sans conséquence pour la crédibilité de l'approche multicritère.

Il est à noter que le problème de la subjectivité est généralement peu abordé. Il existe des méthodes qui supportent la notion de subjectivité, de manière statistique, floue, etc.

Il nous semble en outre nécessaire de fournir systématiquement un ensemble de tests de robustesse afin d'évaluer notamment la sensibilité des paramétrages. Cette analyse peut conforter le décideur dans le cas où certaines informations sont peu précises.

Enfin il est intéressant de noter que dans l'optique multicritère, les deux premières phases de Simon sont primordiales: elles conditionnent la qualité de la construction de la solution (agrégation).

Plusieurs applications ont été développées en environnement industriel: [Tabucanon, 1988] détaille l'intégration de l'approche multicritère au sein de plusieurs fonctions industrielles; [Gandibleux, 1995] pour la conduite de processus continus; [Belton et Elder, 1992] et [Deckro et al.,

1982] traitent du problème de l'ordonnement multicritère. [Pomerol et Barba-Romero, 1993] fournit de très nombreux exemples divers appliqués à l'industrie.

Cependant, il n'existe encore que très peu d'applications de l'approche multicritère au niveau opérationnel (environnement décisionnel temps-réel). Excepté [Tabucanon et al., 1994], nous ne connaissons pas de tentative d'application des méthodes multicritères en environnement de pilotage temps-réel.

### *3.3. L'approche multicritère et les objectifs techniques*

L'analyse multicritère appliquée au niveau du pilotage nous poussent à analyser les processus décisionnels au niveau du pilotage comme résultat d'un compromis entre des critères conflictuels exprimés principalement en terme de coût, délais ou qualité. L'allocation d'un tâche par exemple, est un processus décisionnel qui résulte d'une étude portant sur des critères de coût de production, de temps de changement de série, de temps de convoyage, de temps d'attente dans le stock amont, de qualité de production, etc.

La réactivité est alors nécessairement intégrée d'un point de vue multicritère par la gestion de ces conflits à partir de données brutes issues des capteurs, des bases de données ou des logiciels d'ordonnement, facilitant notamment l'intégration des contraintes ressources (usure, etc.).

D'autre part, l'intégration des contraintes de flux (préférence pour une ressource, commande urgente, prise en compte des temps de transport) est possible de par l'intégration et le rôle de l'opérateur dans le processus de décision.

### *3.4. L'approche multicritère et les objectifs cognitifs*

Un des préceptes de base de l'approche multicritère est qu'un système informatisé n'est certainement pas capable d'intégrer toutes les données qui peuvent être intéressantes ou requises afin de prendre une décision satisfaisante voire réaliste. C'est pourquoi, l'approche multicritère stipule clairement que l'opérateur humain est une composante essentielle du processus de décision. Les méthodes sont par ailleurs souvent interactives pour permettre une construction itérative de la solution.

D'autre part, il faut noter que, selon Schärliig: "l'utilisateur a peur de la complexité" et Pomerol: "la confiance du décideur se porte naturellement sur les méthodes simples". Le premier point fait référence à la confiance en soi alors que le deuxième point fait référence à la confiance dans le système. Comme indiqué ci-dessus, le concept de base de l'approche multicritère est cohérent avec les objectifs cognitifs portant sur la confiance (en soi et dans le système): Ce concept stipule qu'il est plus utile de simplifier la méthode de résolution que d'imposer des hypothèses de travail réductrices de la réalité, autrement dit, l'effet "boite noire" est atténué.

Enfin, il est possible de gérer la charge mentale de l'opérateur en exploitant les outils multicritères orientés "interface avancée" tels que Gaïa couplée avec Prométhée. En effet, l'opérateur se focalise alors sur la résolution du problème à partir d'une information graphique multicritère dont l'utilité a été prouvée [Trentesaux et al., 1997a].

## **4. Systèmes interactifs d'aide multicritère à la décision**

D'une manière générale, les décisions au niveau pilotage concernent:

- la réalisation des tâches,
- le suivi des performances,
- l'évaluation du respect des objectifs.

L'intégration d'un système interactif d'aide multicritère à la décision exploitant le concept d'interface avancée permet de contribuer à l'optimisation de l'intégration de l'opérateur humain. Son rôle est d'établir l'interface support de la coopération entre l'opérateur et le système de pilotage. Cependant, il n'existe à ce jour que peu d'applications des concepts SIAD au niveau pilotage temps-réel, malgré la pertinence d'une telle approche à ce niveau. En revanche, de nombreuses applications ont été développées au niveau prévisionnel et proposent quelques outils de base pour la gestion temps réel des systèmes de production.

Ces systèmes s'appuient principalement sur un ensemble d'approches heuristiques ou empiriques. L'aide est principalement constituée d'un recours à un dialogue du type "What-if?". C'est à dire que l'utilisateur évalue ses décisions à l'aide d'un dialogue plus ou moins complexe basé sur une étude des différents cas de figure. Ces différents cas expriment la plupart du temps le niveau de robustesse vis à vis des aléas (réactivité) ou le respect d'objectifs locaux ou globaux. Le décideur peut alors réitérer l'étape de construction de la décision. Il est évident que ce schéma correspond à celui de Simon.

En fait, le concept de SIAD est inhérent à celui de la structuration des données: plus la structuration est forte, moins il est nécessaire de faire appel à l'homme, donc le SIAD perd son sens dans le système de pilotage. L'identification de la présence de processus décisionnels peu ou pas structurés justifie donc le développement de SIAD multicritère.

## 5. Application au pilotage égalitaire supervisé

Nous proposons une structure de pilotage fondée sur une approche de pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel qui cherche le meilleur compromis entre les structures hiérarchiques et égalitaires d'une part, et les approches avec ordonnancement total ou sans ordonnancement d'autre part. La structure de pilotage est de type égalitaire supervisée (figure 1).

▪

Figure 1. Structure égalitaire supervisée

Nous décomposons la structure de pilotage en deux niveaux égalitaire et superviseur. Le niveau égalitaire est composé d'un ensemble d'agents coopératifs (nommés station intégrées de pilotage: SIP) qui sont composés de cinq sous-système de décision, d'information de communication, d'interface et d'information. Nous discernons deux types de coopérations (figure 2):

“verticale” entre l'opérateur et l'agent. L'opérateur humain est responsable des décisions locales,

“horizontale” qui décrit l'interaction entre agents.

Chaque SIP est responsable d'un ensemble de ressources de production.

▪

Figure 2. structure égalitaire supervisée et types de coopération

Le niveau superviseur correspond à la SIP assurant la supervision des SIP du niveau égalitaire. Cette SIP est elle aussi associée à un opérateur. Elle peut également contrôler directement un ensemble de ressources et participer ainsi au processus de production.

Le rôle du superviseur est principalement de détecter dynamiquement la ressource goulot en fonction des charges de production et de gérer la cohérence globale des décisions locales. Les données prises en compte pour réaliser l'ordonnancement du goulot sont issues de l'état courant et de la charge réelle du système de production.

La détection et l'ordonnancement d'une ressource goulot constituent une démarche événementielle déclenchée par exemple par l'apparition de nouveaux ordres de fabrication.

De cette manière, le sous-ensemble des opérations planifiées correspond aux opérations qui doivent être réalisées sur la ressource goulot durant la période considérée.

La charge potentielle maximale contribue à la désignation de la SIP goulot. Elle est définie pour un ensemble de tâches à effectuer et qui ne sont pas commencées à une date donnée. Le superviseur évalue en premier lieu les tâches qui peuvent être réalisées par chaque ressource en fonction des ordres de fabrication et des gammes opératoires. Il évalue ainsi le temps nécessaire à chaque ressource pour réaliser l'ensemble des tâches qui peuvent lui être allouées. Les différents temps caractéristiques du processus de fabrication sont pris en compte (temps opératoires, temps de préparation, temps de changement outil, temps de réglage, etc.). C'est en ce sens que la charge est

maximale. Elle est potentielle dans le sens où une opération qui peut être réalisée sous le contrôle d'une SIP ne sera pas nécessairement effectuée sous le contrôle de cette SIP.

Le résultat correspond donc au temps maximum que pourrait passer une ressource sur un ensemble de tâches encore non réalisées. Si une opération est en cours sous le contrôle d'une SIP particulière, alors les temps opératoires ne sont pris en compte que pour cette SIP.

La ressource la plus contraignante a priori est la ressource qui présente la charge potentielle maximale. Cette ressource constitue la ressource goulot jusqu'au prochain événement qui provoquera la ré-évaluation des charges et l'identification de la ressource goulot. Le superviseur ordonnance alors cette ressource en fonction des objectifs globaux de production (juste à temps, au plus tôt, etc.).

Les tâches non planifiées sont allouées dynamiquement au cours du processus de fabrication selon un protocole de communication. Puisque, par définition, les ressources non ordonnancées ne sont pas goulot, elles disposent d'une marge temporelle pour absorber les perturbations. Si une perturbation trop conséquente influe sur le respect de l'ordonnancement partiel, une SIP peut avertir du besoin de ré-évaluer les charges et mener ainsi à établir un nouvel ordonnancement.

Trois processus décisionnels sont considérés comme structurés. Ils concernent le processus d'ordonnancement de la ressource goulot:

- détection des charges potentielles maximales par le superviseur,
- choix de la ressource goulot par le superviseur,
- l'ordonnancement partiel de la ressource goulot par le superviseur.

Dans ce cas, le problème d'ordonnancement présente une structuration suffisante (faible combinatoire, données exclusivement numériques, etc.), pour permettre l'exploitation d'une algorithmique d'optimisation faiblement interactive.

Les processus décisionnels peu structurés sont:

séquençement des ordres d'allocation: en particulier le séquençement par le superviseur des premières allocations pour la première opération de chaque ordre de fabrication non planifié. Ce problème se pose aussi pour une SIP qui possède au minimum deux opérations à allouer,

gestion des files d'attente du stock d'entrée: ce processus décisionnel concerne le choix du séquençement de la réalisation des opérations. Il ne concerne généralement pas la SIP goulot qui est ordonnancée, sauf en cas de ré-ordonnancement local,

gestion des variables d'action locales: chaque SIP est responsable d'un ensemble de ressources (production, convoyage, etc.). Il est donc nécessaire de spécifier les paramétrages de ces ressources (taux d'occupation, vitesse, etc.),

gestion de chaque allocation: chaque SIP (y compris éventuellement le superviseur) doit allouer les opérations suivantes à réaliser sur un produit,

pour la ressource ordonnancée: ré-ordonnancement local d'une partie de l'ordonnancement spécifié par le superviseur.

Les processus non structurés sont:

choix de remise en question ou non de l'ordonnancement prévisionnel. Ce choix est fait a priori par le superviseur mais peut être demandé par une SIP,

choix de ré-allocation ou non d'une opération en cours: une SIP peut envisager la ré-allocation d'une opération entamée,

pour la ressource ordonnancée: choix de la remise en question ou non d'une partie de l'ordonnancement prévisionnel.

La complexité qui différencie les processus peu structurés des processus non structurés résulte de la difficulté pour le décideur à évaluer dans sa globalité (au niveau du système de production entier) et de manière relative les solutions envisageables. Dans le cas où le décideur conclut au besoin de ré-allouer par exemple, la ré-allocation est de type peu structuré. Ainsi, dans notre cas:

choix de la remise en question ou non (ré-allocation, ré-ordonnancement): processus non structuré,

dans l'affirmative: processus peu structuré ou structuré.

Cette particularisation montre bien la différence, en terme de complexité, par exemple, entre la comparaison de deux ordonnancements prévisionnels (processus peu ou pas structuré) et l'élaboration d'un ordonnancement prévisionnel (processus structuré). Pour l'ensemble des processus décisionnels peu ou pas structurés, l'intégration de l'opérateur humain permet d'améliorer la qualité du pilotage pour le respect des objectifs.

### 5.1. Choix de la méthode multicritère Prométhée

Outre les objectifs cognitifs et techniques qui sont respectés dans leur globalité par l'approche multicritère et donc a fortiori par les méthodes multicritère, il existe un ensemble de contraintes fixées par la structure de pilotage égalitaire supervisée. Ces contraintes influent donc sur le choix de la méthode. Relevons principalement:

La problématique: choisir parmi un ensemble fini de possibilités (rarement élevé), l'une d'entre elle (allocation, etc.): problématique de choix ou trier un ensemble de possibilités (gestion des files d'attente, etc.): problématique de tri.

la présence de données telles que la qualité du produit finis, la qualification d'un opérateur, le temps moyen opératoire, etc. sont des données qualitatives ou estimées (par des fonctions de probabilité par exemple) qu'il serait judicieux d'intégrer à l'algorithme multicritère pour éviter de pénaliser l'intérêt de prendre en compte des données réalistes, objectif que nous nous sommes fixé.

le besoin de définir une méthode facilement interactive et aussi simple que possible dans son algorithmique (en référence à la notion de confiance): en effet, l'utilisateur final ne sera pas, en général, un expert dans le domaine du multicritère (ce qui n'est généralement pas le cas pour une étude dont l'échelle temporelle est plus large: investissement, politique d'embauche, etc.) généralement sous la responsabilité d'experts en la matière.

le besoin d'utiliser une méthode facilement interfaçable avec un environnement graphique avancé (au sens "advanced display"),

le besoin de permettre l'automatisation de la décision: dans le cas où l'utilisateur laisse le système de pilotage commander seul le système de production.

La question est dès lors:

"Quelle(s) méthode(s) multicritère(s) peut(vent) proposer un compromis intéressant entre les contraintes imposées par ces trois domaines structurellement indépendants que sont le pilotage distribué, l'analyse multicritère et la psychologie?"

Une première étude nous a poussé à évaluer Prométhée, malgré le fait que ce soit une problématique de tri [Brans et Vincke, 1985]. Nous justifions cette étude par le fait que Prométhée propose une alternative intéressante au compromis présenté:

1. Prométhée est une méthode qui traite les cas discrets.

2. Prométhée possède une interface graphique (Gaïa) présentant sous forme d'étoile graduée les différentes alternatives et résultats spécifiques à la méthode (flux d'entrée et de sortie). Cette interface présente certaines des caractéristiques de base des interfaces avancées (perception des compromis, des solutions dominées et dominantes, etc.) et peut être spécifiée et particularisée au problème du pilotage distribué.

3. La méthode Prométhée a le mérite d'être simple. Elle est facilement implémentable et spécifiable en fonction du problème, très intuitive et compréhensible par l'utilisateur non nécessairement expert (cf. la notion de confiance). C'est la principale différence avec les exemples proposés dans la littérature où la complexité de la méthode implique une connaissance experte de la personne qui traite le processus de décision.

4. Le classement donne une idée très claire à l'utilisateur de l'état des choses et de la robustesse a priori des décisions possibles. Ce point est fortement lié à la question de l'aide: "que peut-il être judicieux de montrer à l'opérateur pour qu'il puisse se faire une idée rapide de la situation?". L'opérateur qui connaît un élément que le système ne prend pas en compte (donnée peu structurée) peut contourner ainsi le classement proposé par la machine et évaluer la robustesse de ses choix. La question sous-jacente est de savoir s'il assume son choix alors que le système d'aide lui conseille autre chose. Mais cela relève plus de l'auto-responsabilité et de la confiance en soi.

5. L'intégration de la robustesse a été évaluée par le développement d'une méthode statistique qui, à partir des données fiables et capitalisées, permet d'analyser l'impact de la variation de l'ensemble des données sur le choix du décideur, le tout graphiquement.

Cette simplicité induit naturellement un inconvénient important:

La méthode Prométhée projette parfois une riche et subtile capacité de réflexion (veto, incomparabilité, indifférence, noyaux, etc.) sur un axe forçant parfois la comparabilité et la transitivité. Cette remarque ne tient compte que du premier point des 3 qui composent le compromis: le multicritère. Au regard de cet unique point de vue, il est évident que Prométhée est peu riche. Cependant, en prenant en compte les deux autres points de vue (pilotage distribuée, psychologie) le compromis est équitable.

Une solution envisageable pour remédier à cet inconvénient est de greffer sur la phase d'agrégation de Prométhée une technique de choix valué intégrant la notion de noyau. Ceci éviterait de forcer la transitivité et ainsi permettrait de conserver la souplesse de l'approche tout en proposant une meilleure qualité de décision.

Enfin, il est possible d'utiliser Electre [Roy et Bouyssou, 1993], mais un effort important doit être réalisé pour:

réaliser une interface avancée associée ou apparaissent de manière simple les notions de seuil de veto et de noyau,

gérer la multiplicité ou l'absence de noyau: en cas d'urgence, l'opérateur doit faire un choix valable et rapide: il ne doit donc pas être confronté à l'absence ou à la multiplicité non comparable de solutions, étant lui même certainement en état de stress. Une solution consiste à exploiter la notion de quasi-noyau qui permet d'obtenir au moins une solution, mais cette notion complique sensiblement la compréhension de la méthode par l'opérateur.

proposer des outils simples et rapides pour analyser la robustesse. Les premiers essais proposés par Roy sont valables uniquement lorsque l'on analyse la sensibilité des résultats par rapport à très peu de données susceptibles d'évoluer, ce qui est rarement le cas dans un environnement de pilotage réactif.

L'exploitation d'une telle méthode (considérée comme référence dans le domaine) est donc envisageable, mais au prix d'une adaptation importante à notre problème. En première analyse, notre choix s'est donc porté sur Prométhée.

## *5.2. Liste de critères*

En accord avec les trois axes de signification introduits auparavant, i.e., le coût, les délais et la qualité, il est possible de construire un ensemble de critère. Nous proposons les principaux dans la liste ci dessous.

### 5.2.1. Axe de signification: le coût (unité de mesure monétaire)

Critère n°C1: le coût de production

Nous découplons les critères qui sont naturellement explicités en terme de coût des autres critères. Il est clair que pour un industriel, une perte de temps se décrit en perte d'argent. C'est une approche par agrégation transitive (plus une machine est en retard sur son programme, plus les coûts sont élevés) qui réduit fortement l'intérêt d'intégrer une approche multicritère. C'est pourquoi ce premier critère doit être exempt de toute interprétation en terme d'unité de temps ou en terme de qualité. C'est à ce niveau qu'une perspective des plus intéressante provient de l'exploitation de l'approche Activity Based Costing dont l'objectif est de définir un coût représentatif, fiable et capitalisé de chaque activité industrielle.

### 5.2.2. Axe de signification: le délai (unité de mesure temporelle)

Critère n° D1: temps opératoire d'une ressource pour une opération

Le temps opératoire représente le temps nécessaire à une ressource pour effectuer une tâche particulière. Les temps de préparation, de changement outil, de préchauffage, etc. sont exclus pour proposer une agrégation a priori minimale des données.

Critère n° D2: temps de préparation d'une ressource pour une opération

Ce temps représente l'ensemble des opérations de préparation sur une machine pour une tâche donnée. Il est possible d'agréger les temps de changement outil, de préchauffage, de manutention, etc. En effet, cette agrégation ne nuit en rien à la spécification du critère.

Critère n° D3: temps de transfert potentiel

Ce critère indique les temps de transfert entre ressources lorsqu'il est nécessaire. Ce critère mesure le temps écoulé entre le stock de sortie d'une première SIP et l'arrivée du produit dans le stock d'entrée d'une seconde SIP.

Critère n° D4: prochaine date de disponibilité

La prochaine date de disponibilité libre correspond à la date à partir de laquelle la SIP sera capable de réaliser, en théorie, une opération donnée. Ce critère ne prend pas en compte les éventuelles modifications de cette date liées par exemple aux allocations ou ré-allocations potentielles.

Critère n° D5: marge potentielle libre du produit

Ce critère représente la marge libre pour un produit entre un instant  $t$  et la date de besoin du produit. Ce critère peut prendre les deux formes suivantes:

“marge minimum” (en fonction de la date au plus tôt) qui décrit le temps libre en fonction de la date courante, de la date de besoin au plus tôt et des tâches qui restent à réaliser,

“marge potentielle” qui décrit la capacité d'absorption d'un aléa de production sans provoquer de retard. Ce critère peut expliciter un phénomène largement usité dans le milieu industriel qui est celui de la priorité. Cependant, la notion de règle de priorité a pour inconvénient de provoquer la perte de l'information du retard car elle exprime une notion ordinale généralement par l'intermédiaire d'un nombre entier. Nous lui préférons ainsi celle de marge potentielle.

Les données utilisées pour les critères D1 à D5 peuvent être quantitatives. Cependant, il nous semble plus réaliste de les modéliser sous forme de données incertaines, puisqu'elles concernent un temps anticipé probable.

### 5.2.3. Axe de signification: la qualité (avec ou sans unité)

Critère n°Q1: taux d'usure

Ce critère regroupe l'ensemble des taux d'usures dont le décideur doit tenir compte lors d'un processus décisionnel. En effet, la qualité de production peut dépendre de l'état d'usure d'un outil.

Critère n°Q2: caractéristique outil

Ce critère permet de prendre en compte le fait qu'un outil soit considéré comme investissement à rentabiliser.

Critère n°Q3: niveau de spécialisation

Il est utile également de pouvoir prendre en compte la spécialisation de l'opérateur (critère N°Q3a) et de la machine (critère N°Q3b). Ce critère permet ainsi d'utiliser les compétences respectives. Une attention particulière doit être donnée à l'intégration du critère Q3a qui nécessite implicitement la diffusion parmi l'ensemble des SIP d'une évaluation de l'opérateur. Cet aspect psychologique doit être scrupuleusement étudié.

Les critères Q1, Q2 et Q3 sont représentés sous forme de pourcentage. Le critère Q3 est un critère difficilement chiffrable dont la nature est sans dimension. Une solution consiste alors à utiliser la terminologie courante pour qualifier les compétences des opérateurs (OS1, OS2, etc.)

La liste de critères présentée nous semble suffisante pour constituer une base de critères capable de prendre en compte la plupart des cas industriels d'atelier job-shop. Il peut cependant être nécessaire de définir d'autres critères en fonction de la spécificité du système de production ou des objectifs de production. Par exemple, dans le cas d'un équilibrage de charge, un critère prenant en compte le nombre d'opérations réalisées ou le temps total productif pour chaque ressource peut-être utilisé. Un autre exemple concerne le cas où un des objectifs globaux est de réduire le niveau de stock moyen. Un critère particulier doit être élaboré pour représenter chaque aspect.

C'est au niveau de la spécification en fonction des contraintes de gestion qu'il faut établir un ensemble de listes et ainsi vérifier les conditions de qualité de la liste explicitée par Roy. Cette liste est donc constituée d'un sous-ensemble de la liste présentée.

Nous allons proposer un ensemble de sous-listes en fonction du processus décisionnel concerné au niveau du pilotage égalitaire supervisé.

### 5.3. Liste des processus

#### 5.3.1. Processus peu structurés

##### Gestion du stock d'entrée d'une SIP

Le critère C1 est inutile car la tâche est déjà allouée. Il en est de même pour les critères D1, D3, D4, Q1, Q2 et Q3. Ainsi seuls les critères D2 (temps de préparation) qui stipule qu'il peut-être intéressant d'éviter de modifier la configuration machine en réalisant une tâche de la même famille et D5 qui tient compte du temps disponible pour la réalisation de la tâche subsistent.

##### Séquencement des allocations

Que ce soit au niveau superviseur ou au niveau distribué, lorsque deux opérations ou plus sont en stock de sortie, le séquencement des allocations influe sur les performances globales. Cette influence est encore plus sensible lors de la phase initiale d'allocation par le superviseur.

Le critère D5 est prépondérant pour déterminer l'ordre avec lequel les allocations sont à réaliser. Le critère D3 est utilisé, ainsi que les critères Q1, Q2 pour prendre en compte des souhaits de rentabilité.

##### Allocation de tâche

Tous les critères explicités auparavant excepté le critère n°D5 (qui n'est pas lié aux capacités des ressources) sont utilisés. Ces sept critères montrent la complexité du processus d'allocation. La qualité des allocations conditionne fortement les performances d'un système de production distribué non supervisé. Ainsi, une allocation peu judicieuse peut causer des conséquences critiques sur l'ensemble du processus de production. Nous avons pu constater que l'approche par supervision permet de diminuer cette influence, et ainsi amoindrir l'importance de cette phase.

##### Gestion des variables d'action locales

L'ensemble des décisions qui ont trait à la gestion locale des ressources sont concernées. Dans le cas d'une ressource de type machine, ces variables s'apparentent aux vitesses (taux) de production, à la taille des lots, aux capacités de stockage, etc. Pour une ressource de type convoyeur, elles s'apparentent à la vitesse de convoyage.

##### Re-ordonnancement local (modification de l'ordonnancement superviseur)

Il est possible pour une ressource ordonnancée de remarquer un retard par exemple dans l'arrivée d'une tâche qui devrait être en cours de réalisation selon l'ordonnancement prévisionnel instauré par le superviseur. Dans le cas où une remise en question est décidée, il est nécessaire de trier les tâches en attente. Ce problème est donc typiquement celui de la gestion du stock d'entrée.

#### 5.3.2. Processus non structurés

##### Choix de remise en question de l'ordonnancement prévisionnel

Ce processus décisionnel concerne le niveau de supervision. Il est clair qu'une telle décision requiert une expérience et une connaissance du système de production approfondie pour évaluer l'impact d'un événement au niveau global. Une première approche consiste à établir une typologie des cas qui nécessitent automatiquement une remise en question de l'ordonnancement. Certains événements s'intègrent aisément dans cette typologie. C'est le cas à chaque fois qu'une commande est lancée en production, car elle modifie le processus entier de fabrication. Mais la question se pose réellement dans le cas d'une ou plusieurs pannes machines. Il faut alors être capable d'évaluer l'impact de cette panne sur le séquencement des opérations pour justifier ou non du besoin de ré-ordonnancement. Cette évaluation est difficile à réaliser et fait explicitement appel à la connaissance et à l'expérience de l'opérateur humain, ce qui caractérise un processus décisionnel très peu structuré.

Choix de re-allocation d'une opération en cours

Le choix de réallocation peut-être réalisé à deux moments distincts:

la tâche à ré-allouer n'a pas encore été commencée, ce qui correspond à la présence de l'opération dans le stock d'entrée. Ce cas de figure est possible si le moyen de production est en fonctionnement dégradé durant un certain temps. Dans ce cas, on peut décider de ré-allouer si possible les tâches en attente. Un module de gestion particulier doit prendre en compte une ré-allocation de ce type (l'opération passe alors du stock d'entrée au stock de sortie). La difficulté intervient lors de l'évaluation de la nécessité de la ré-allocation. Ceci dépend principalement du temps de non-disponibilité de la ressource de production.

la tâche à allouer est en cours de production. Ce processus décisionnel nécessite un niveau de supervision pour intégrer la modification sur la tâche à réaliser qui stipule que l'opération a été partiellement réalisée. Cela sous-entend qu'une telle réalisation partielle puisse être possible à la fois par la machine qui arrête sa production et à la fois par celle qui reprendra ce processus de production. Dans tous les cas, la nature de la décision est identique au cas précédent et est associée à un processus décisionnel non structuré.

Choix de remise en question de l'ordonnancement partiel

Toutes les opérations qui correspondent à un produit présent dans le stock d'entrée de la ressource goulet sont planifiées. Le choix de remise en question doit être envisagée par exemple, dans le cas d'un retard. Une évaluation de celui-ci permet de réaliser une tâche (sous réserve qu'il y en ait une disponible) dont la durée est inférieure à la durée de retard estimé (une autre alternative consiste à ne pas tenir compte du retard et commencer l'opération suivante planifiée et présente sans attendre).

De manière générale, il est évident qu'une telle remise en question nuit fortement au respect des objectifs globaux car elle modifie le séquençement des opérations planifiées, et ce, bien qu'une modification de l'ordonnancement puisse éviter de rendre non-productive une ressource goulet (selon le principe de Goldratt). Une méthode systématique consiste à demander un ré-ordonnancement à chaque modification, mais cela imposerait au superviseur de procéder à ce ré-ordonnancement plus fréquemment.

### 5.3.3. Processus structurés

Ces processus sont:

- calcul des charges potentielles,
- choix de la ressource goulet,
- élaboration de l'ordonnancement.

La catégorie des processus structurés peut-être gérée sans intervention de l'opérateur humain par une méthode algorithmique. De plus, une approche par optimisation est possible car l'ordonnancement n'est plus NP-complet. En effet, il concerne une seule ressource et non la totalité d'entre elles.

Cependant, de nombreux exemples récents (voir par exemple [Bourgeois, 1994], [Billaut et Roubellat, 1993], [Legall, 1989], etc.) ont montré l'intérêt de l'interactivité dans le calcul et l'évaluation d'un ordonnancement. L'intégration du multicritère est nécessaire [Belton et Elder, 1992]. Un autre intérêt de cette méthode est par exemple de permettre à l'utilisateur de trancher entre plusieurs goulets potentiels ou de décider lui-même sans l'intervention du SIAMD quelle est la ressource goulet. Dans ce cas, la prise en compte d'événements spécifiques est possible (anticipation de commandes, etc.).

## 6. Evaluation

### 6.1. Mise en oeuvre de notre proposition

La maquette a été développée sur les matériels et logiciels suivants:

matériels: ordinateurs de type PC Pentium (calculateurs monoprocesseur),

logiciels: Microsoft Windows NT 4.0, Borland C++ 5.0, Winsockets, gestionnaire réseau TCP/IP.

Deux prototypes ont été réalisés, un monoposte et un multipostes exploitant le réseau Internet (3 PC). Ce dernier, dont la viabilité a été vérifiée, est encore en cours de développement. Le prototype monoposte permettra d'évaluer l'impact de la coopération et de l'exploitation de l'interface avancée pour un opérateur. Les autres SIP seront gérées par l'ordinateur. L'objectif est, en premier lieu, d'évaluer un poste pour ensuite évaluer l'ensemble des postes.

L'évaluation présentée dans cet article porte sur l'influence des choix des paramètres de la méthode multicritère pour plusieurs simulations d'un même lot d'ordres de fabrication. Ce choix peut se faire par l'intermédiaire de plusieurs boîtes de dialogues comme indiquée sur la figure 3.

▪

figure 3. Exemple de boîte de dialogue

### 6.2. Cas d'étude

Le cas d'étude est un atelier flexible de finition d'une usine spécialisée dans la fonderie de précision.

La structure de production globale comporte deux parties (figure 4): une partie présentant des caractéristiques flow shop et une seconde job-shop.

▪

Figure 4. représentation schématique de l'usine

La méthode pour obtenir les pièces de fonderie s'appuie sur le principe de la cire perdue. Ce principe est le suivant:

section flow shop: un prototype de la pièce est réalisé. Ce prototype donne naissance à quelques moules réalisés à l'aide de ressources physiques telles que l'électro-érosion. La seconde section réalise autant de pièces spécifiées par le cahier des charges (inclus les rebuts éventuels) à partir des moules. Les pièces sont réalisées à partir d'une cire spéciale. Ces pièces sont alors fixées en grappe. Les grappes passent ensuite dans la section revêtement où elles sont enduites de différentes couches de céramiques. Une fois sèches, ces grappes sont cuites dans des fours thermiques. La cire est détruite et ne reste que la couche en céramique cuite. De l'acier en fusion (nuances) est alors versé dans ces grappes. Une fois refroidies, ces grappes sont détruites et sont tronçonnées. Les pièces sont alors prêtes à entrer dans l'atelier de finition.

section job-shop: les produits semi-finis sont alors ébavurés, sciés, soumis à traitement thermique, grenailés, contrôlés (contrôle visuel et qualité), calibrés, emballés, expédiés. Certaines étapes peuvent être répétées plusieurs fois selon la gamme opératoire.

L'étude porte sur onze ressources. Les ordres de fabrication ont été élaborés à partir de plusieurs gammes de fabrication réelles.

L'objectif de l'entreprise est de travailler en juste à temps. De ce fait, nous nous attachons à l'intégration de cet objectif global. La définition de la caractéristique "juste à temps" d'un ordonnancement est proposée dans [Trentesaux et al., 1997b]. Cette caractérisation nous permet d'établir une première analyse. Elle se base sur le retard moyen et l'écart type des retards de l'ensemble des ordres de fabrication comme suit:

est un ordonnancement plus "juste à temps" que ou surclasse lorsque la valeur absolue de la moyenne des retards de est inférieure à celle de et que l'écart type associé est lui aussi inférieur:

(1) et

(2) .

On note . Si (1) ou (2) n'est pas vérifiée, on ne peut conclure. On pose .

Cette définition n'est certainement pas générique. Elle nous permet cependant d'avoir une image correcte de la caractéristique juste à temps d'un ordonnancement. Cette problématique est en fait multicritère: dans le cas , il est nécessaire de définir d'autres critères pour élaborer une préférence.

Une évaluation de l'influence des paramétrages de la méthode multicritère a été réalisée pour deux critères présentés (parmi quatre en tout). Cette étude doit mettre en relief la commandabilité d'un processus décisionnel par le poids des critères, nécessité requise pour envisager l'intégration de l'opérateur. Dans la négative, elle est inutile car sans influence sur les résultats, l'idée étant d'évaluer l'impact potentiel de la pondération sur les résultats. De ce fait, l'étude ne porte que sur un processus décisionnel en mode automatique, c'est à dire sans l'opérateur: nous avons opté pour le processus d'allocation. Nous avons en outre évalué cet aspect pour deux structures de pilotage: la première totalement égalitaire (aucune opération planifiée, elles sont toutes allouées dynamiquement) et la seconde égalitaire-supervisé (caractérisé par la présence d'un ordonnancement partiel planifié le superviseur). Les trois stratégies adoptées sont les suivantes:

favoriser la minimisation du critère D1 (temps opératoire) par rapport aux trois autres critères choisis,

favoriser la minimisation du critère D4 (prochain date de disponibilité) par rapport aux trois autres critères choisis,

favoriser à la fois la minimisation des critères D1 et D4 par rapport aux autres critères.

Les résultats sont données sur la table 1.

Ordre de fabrication	Date de besoin	Pilotage Hybride			Pilotage égalitaire		
		Retard D1	Retard D4	Retard MIX	Retard D1	Retard D4	Retard MIX
1	250	-0,4	+32,3	+11,6	+282	+32,3	+41,7
2	700	+73,3	+85,3	+238,6	+281	+232,2	+132
3	450	+35,4	+47,4	+63,3	-82,8	+47,4	+433,4
4	300	+35,4	+55,8	+55,8	+318	+55,8	+47,4
5	500	+16,6	+32,5	+32,5	-101,6	+32,5	-67,7
6	880	+101,9	+113,3	+162,9	-96,6	-146	-246,2
7	850	+27,6	+39,6	-5,3	+37,7	-11,7	-111,9
8	950	+36,9	+48,9	+97,4	+54,7	-7,6	-7,6
9	1000	+124,7	+132,6	+132,6	+164	+101,7	+101,7
		(50,2; 41,2)	(65,3; 36,6)	(87,7; 78,8)	(95,2; 171,7)	(37,4; 100,4)	(35,9; 189)

Table 1. influence du critère

Le graphe de surclassement "juste à temps" correspondant à la table 1 est le suivant (figure 5):

.

Figure 5. graphe de surclassement

A partir de cette figure, plusieurs remarques peuvent être formulées:

Tout d'abord, il est possible de déterminer le noyau de ce graphe, il est composé de l'ordonnancement hybride favorisant le critère D1 et de l'ordonnancement hybride favorisant le critère D4. Ce qui signifie que ces deux ordonnancements sont plus "justes à temps" que tous les autres, sauf l'ordonnancement égalitaire qui favorise à la fois le critère D1 et à la fois le critère D4 qui

est lui, incomparable à tout autre ordonnancement. Ces résultats se retrouvent sur la table 1. L'incomparabilité de l'ordonnancement égalitaire est dû à la faible moyenne des retards et à l'importante valeur de l'écart type qui le caractérise, ce qui en fait un cas à part. On met par ailleurs en évidence l'incomparabilité des deux ordonnancements du noyau (à la fois la moyenne et l'écart type de l'un ne sont meilleurs que la moyenne et l'écart type de l'autre): ce point permet de mettre en évidence les deux ordonnancements qui proposent le meilleur compromis.

D'autre part, le noyau (pilotage hybride) illustre le principe fondateur de la méthode OPT par Goldratt (un retard sur la ressource goulet est un retard pour l'ensemble de la production) puisque les allocations dynamiques au plus tôt ou au plus vite au niveau des ressources non goulets permettent d'absorber les retards potentiels de la ressource goulet qui est exploitée au maximum de ses possibilités par l'ordonnancement partiel, ce qui mène aux résultats relativement performants de la structure hybride pour un objectif de production "juste à temps".

Enfin, l'ordonnancement égalitaire dont le critère favorisé est le critère D1 (minimisation du temps opératoire) est surclassé par tous les autres ordonnancements (excepté par celui qui n'est pas comparable). Ceci met en évidence la difficulté pour une telle structure d'intégrer un objectif de production "juste à temps", alors que le processus d'allocation va avoir pour conséquence de favoriser l'allocation de l'opération à la SIP capable de réaliser l'opération au plus vite, sans prendre trop en compte le prochain temps libre de cette ressource, ce qui produit des résultats peu performants. La prise en compte au même niveau d'importance de ces deux critères mène à une stratégie performante de production au plus tôt, ce qui se représente par l'incomparabilité identifiée auparavant de l'ordonnancement égalitaire favorisant les deux critères: les stratégies différentes mènent à des résultats naturellement incomparables. Ceci n'est pas le cas lorsqu'un niveau de supervision permet d'intégrer plus facilement une contrainte globale, même si l'on favorise les deux critères: d'où la possibilité de comparer les ordonnancements issus de la structure hybride.

L'approche multicritère exploitée ici permet ainsi l'analyse des résultats en vue de l'élaboration de stratégies en plus de son application au niveau de l'allocation des opérations, ce qui constitue un autre avantage. Cet exemple met en évidence la capacité d'intégration des préférences par rapport aux objectifs et à la structure sous la forme de critère. Il nous permet par ailleurs d'envisager la nécessité de proposer une phase d'analyse précise de l'impact des décisions locales sur le respect des objectifs globaux. Une typologie de stratégies peut alors être définie.

De manière plus précise et dans le cadre de cette étude, une analyse plus précise de l'influence des pondérations permet de définir les paramétrages qui permettent de répondre aux objectifs de juste à temps, analyse a priori complexe, mais dont notre approche permet de mieux gérer la complexité. L'intégration de l'opérateur humain est ainsi logiquement facilitée. Notre prochain objectif est de procéder à cette intégration et de proposer des outils d'analyse de la performance de cette intégration et de vérifier ainsi la validité de notre approche.

## **Conclusion**

La validation est encore au stade préliminaire (l'exemple précédent illustre uniquement le potentiel envisageable en terme d'intégration de l'opérateur et ne concerne qu'un seul processus décisionnel: l'allocation dont on a montré la commandabilité par les poids). On se heurte très rapidement au problème d'évaluation dès que l'opérateur est présent dans le processus décisionnel, d'autant plus que notre objectif est d'évaluer un pilotage à décisions réparties sous la responsabilité de plusieurs opérateurs pour plusieurs processus décisionnels différents dans des contextes différents. L'objectif de cet exposé est de montrer que l'analyse multicritère semble contribuer, tout comme la notion d'interface avancée, à l'optimisation de l'intégration de l'opérateur humain dans le processus décisionnel au niveau du pilotage. Nous avons ainsi montré qu'il était envisageable d'exploiter certaines méthodes multicritère existantes pour les adapter à notre problématique: nous avons illustré nos propos par une première analyse de l'impact des choix au niveau de la méthode en elle-même au niveau des résultats par rapport aux objectifs globaux.

Enfin, l'interface avancée pour le pilotage égalitaire (supervisé ou non) est en cours de développement. Il nous sera nécessaire de définir aussi un protocole d'évaluation de cette interface et d'évaluer ainsi son impact sur la qualité du pilotage localement et dans sa globalité.

Il est à noter qu'il n'existe actuellement pas de spécification ou de modèle générique de SIAMD distribué au niveau opérationnel. Il nous semble important de pouvoir définir une structuration générique permettant l'application à divers domaines, dans un environnement temps-réel, coopératif et distribué.

### **Bibliographie**

[Belton et Elder, 1992] Belton V. et Elder M. D., Can Multiple Criteria Methods Help Production Scheduling?, 10th international conference on M.C.D.M TAIPEI', Taïwan, 1992, pp. 341-349.

[Bourgeois, 1994] Bourgeois S., Contribution à la conception de systèmes interactifs d'aide à l'ordonnancement dans les ateliers manufacturiers, thèse de doctorat, université de Valenciennes, France, 1994.

[Billaut et Roubellat, 1993] Billaut J.C., Roubellat F., A decision support system for real-time production scheduling, International conference on Industrial Engineering and Production Management, Mons, Belgique, Juin 1993, pp. 449-462.

[Brans et Vincke, 1985] Brans J. P. and Vincke P., "A preference ranking organization method- The Prométhée method" Management Science 31 (1985) 647-656.

[Deckro et al., 1982] Deckro R. F, Herbert J. E. et Winkofsky E. P., Multiple criteria job-shop scheduling, Computer & operational research, vol. 9, n° 4, 1982, pp.279-285.

[Fodor et Roubens, 1994] Fodor J. et Roubens M., Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support, Theory and decision library, n° 14, Kluwer academic publishers, 1994.

[Gandibleux, 1995] Gandibleux X., Système d'aide à la décision pour la conduite de processus perturbés; une approche hybride fondée sur l'intelligence artificielle, la programmation linéaire et l'aide multicritère à la décision, thèse de doctorat, université de Valenciennes, France, 1995.

[Korhonen et al., 1992] Korhonen P., Moskowitz H. et Wallenius J., Multiple criteria decision support- A review, European Journal of Operational Research, n° 63, 1992, pp. 361-375.

[Legall, 1989] Legall A., Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage temps réel d'atelier, Thèse de doctorat, université de Toulouse, Toulouse, France, 1989.

[Pomerol et Barba-Romero, 1993] Pomerol J. C. and Barba-Romero S., Choix multi-critère dans l'entreprise, collection Informatique-Hermès, Paris, 1993.

[Roy, 1985] Roy B., Méthodologie multi-critère d'aide à la décision, Economica, Paris, 1985.

[Roy et Bouyssou, 1993] Roy B., Bouyssou D., Aide multi-critère à la décision: Méthodes et cas, Economica, Collection Gestion, Paris, 1993.

[Schärlig, 1985] Schärlig A., Décider sur plusieurs critères - Panorama de l'aide à la décision multicritère, Presse polytechniques et universitaires romandes, Col. diriger l'entreprise 1, Lausanne, Suisse, 1985.

[Tabucanon, 1988] Tabucanon M. T., Multiple criteria decision making in industry, Studies in production and engineering economics, n° 8, Elsevier, 1988.

[Tabucanon et al., 1994] Tabucanon M. T., Batanov D. N. et Verma D. K, Decision support system for multicriteria machine selection for flexible manufacturing systems, Computers in industry, vol. 25, n° 2, 1994, pp. 131-143.

[Trentesaux et al., 1997a] Trentesaux D., Moray N., and Tahon C, Integration of the Human Operator into Responsive Discrete Production Management Systems, 7th Mini Euro Conference, Bruges, March 24-27, 1997.

[Trentesaux et al., 1997b] D., Tahon C. and Ladet P., "Hybrid production activity control: a JIT distributed-based structure for FMS" Artificial Intelligence Engineering (1997).

[Vincke, 1989] Vincke P., L'aide multicritère à la décision, ed. Université de Bruxelles, ed. Ellipses, Belgique, 1989.

[Zeleny, 1982] Zeleny M., Multiple Criteria Decision Making, MC Graw-Hill, New-York, 1982.