



HAL
open science

D-Sign : un cadre méthodologique pour l'ordonnancement décentralisé et réactif

Damien Trentesaux, Mariem Gzara, Slim Hammadi, Christian Tahon, Pierre
Borne

► **To cite this version:**

Damien Trentesaux, Mariem Gzara, Slim Hammadi, Christian Tahon, Pierre Borne. D-Sign : un cadre méthodologique pour l'ordonnancement décentralisé et réactif. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 2001, 35 (7-8), pp.933-962. hal-01876113

HAL Id: hal-01876113

<https://hal.science/hal-01876113>

Submitted on 18 Sep 2018

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.

D-Sign : un cadre méthodologique pour l'ordonnancement décentralisé et réactif

Damien Trentesaux* — Mariem Gzara** — Slim Hammadi** —
Christian Tahon* — Pierre Borne**

* *Equipe systèmes de production*
LAMIH, UMR CNRS 8530
Le mont Houy, F-59313 Valenciennes cedex 09
Damien.Trentesaux@univ-valenciennes.fr

** *LAIL, Ecole Centrale de Lille*
BP 48, F-59651 Villeneuve D'Ascq

RESUME: L'approche décentralisée est de plus en plus utilisée afin de résoudre les problèmes du pilotage des systèmes de production. Cependant, la majorité des contributions se focalise sur la proposition d'un modèle de pilotage sans toutefois placer cette activité de recherche dans un cadre plus large de conception et d'évaluation des ordonnancements réactifs générés, ce qui permettrait de mieux justifier de l'intérêt de cette approche vis à vis des approches existantes. L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'aide à l'ordonnancement réactif qui complète l'utilisation de l'approche décentralisée par les outils issus de la logique floue et de l'analyse multicritère afin de prendre en compte des mécanismes d'évaluation et d'analyse de l'impact des paramètres. Cette méthode se décrit au travers de quatre processus : conception, exploitation, analyse et amélioration. Un exemple illustre notre proposition.

ABSTRACT: the decentralised approach is more and more used to solve the production scheduling & control issues. Meanwhile, most of contributions focus on the proposal of a model without replacing this research activity within a larger responsive scheduling design and evaluation context, which would make it easier to justify the interest of this approach vs. other ones. The aim of this paper is to propose a responsive scheduling method based on the joining of the decentralised approach, of fuzzy logic and of multi-criteria analysis to support evaluation process and tuning. This method can be described through four processes: design, exploitation, analysis and improvement. An example illustrates our proposal.

MOTS-CLES: méthodologie de conception, ordonnancement réactif, pilotage, aide à l'ordonnancement, approche décentralisée, logique floue, analyse multicritère.

KEY WORDS: design methodology, responsive scheduling, production control, scheduling support, decentralised approach, fuzzy logic, multi-criteria analysis.

1 Introduction

Un ordonnancement correspond à une spécification d'un produit Cartésien : $C = \{^{\text{''}}\text{Quoi''}\} \times \{^{\text{''}}\text{Quand''}\} \times \{^{\text{''}}\text{Où''}\}$ où $\{^{\text{''}}\text{Quoi''}\}$ est constitué de l'ensemble des tâches à effectuer (dans le cas présent, ces tâches sont des opérations), $\{^{\text{''}}\text{Quand''}\}$ est constitué des dates de début et de fin de réalisation des tâches, et $\{^{\text{''}}\text{Où''}\}$ est constitué de l'ensemble des ressources réalisant les tâches (ressources de production) [PAR 91]. La spécification complète de C définit un ordonnancement global et s'obtient par (sous) spécifications itératives de sous-ensembles du $\{^{\text{''}}\text{Quoi''}\}$ ou du $\{^{\text{''}}\text{Où''}\}$ correspondant à des ordonnancements dits partiels, et établis en fonction de stratégies de placement.

Parmi les différentes classes de problèmes d'ordonnancement, nous nous intéressons à la classe des ordonnancements asynchrones dynamiques encore appelés réactifs [ESQ 99]. Dans le cadre de cet article, cette hypothèse se concrétise par le fait que les sous-spécifications réalisées à un instant t doivent tenir compte de l'état des ressources composant le système de production jusqu'à cet instant.

Parmi les différentes approches envisageables pour réaliser un ordonnancement réactif (et *a fortiori*, remplir une fonction de pilotage), nous nous intéressons à l'approche décentralisée, essentiellement de par sa capacité naturelle à faire émerger une solution globale par interaction dynamique entre entités communicantes.

Malgré cette capacité naturelle, cette approche présente plusieurs inconvénients dus au fait qu'elle conduit à la conception de systèmes décentralisés de pilotage et d'ordonnements réactifs fortement paramétrés et intrinsèquement différents, voir par exemple [BUR 91], [CHE 97], [DUF 94], [GOU 99], [KOU 99], [FER 93], [MEB 96], [PUJ 99], [ROY 98] et [TCH 94]. La conséquence est qu'il est difficile dès lors de pouvoir réellement justifier de l'intérêt des systèmes décentralisés conçus et de montrer par conséquent ce que cela apporte par rapport à d'autres solutions existantes éventuellement centralisées (par exemple, celles dérivant du concept de groupe d'opérations permutables [ROU 95]). Ainsi, bien que ces travaux illustrent la faisabilité de l'approche décentralisée dans le domaine du pilotage et de l'ordonnement réactif, peu se sont réellement focalisés sur les activités d'analyse des résultats ou d'analyse de l'impact des paramétrages sur les performances, ce qui met en exergue un manque au niveau méthodologique [PAT 98].

L'objet de cet article est ainsi de proposer un cadre méthodologique d'aide à la paramétrisation de systèmes décentralisés et à l'évaluation des ordonnancements réactifs générés par une analyse de performances et par simulations. Les paramètres ainsi définis contribueront à garantir un fonctionnement satisfaisant dans un cadre futur de production en temps-réel (sur site). La méthode proposée est une méthode globale de Conception, de Simulation, d'Evaluation et d'Amélioration de Systèmes Décentralisés pour l'Ordonnement Réactif, appelée D-Sign. Elle est orientée multi-modèle. Elle complète avantageusement les concepts issus du domaine de l'intelligence artificielle distribuée pour la génération d'ordonnements par ceux

issus du domaine de la logique floue et de l'analyse multicritère pour l'évaluation des performances et le choix des paramètres.

La partie suivante décrit la méthode D-Sign et les processus qui la composent. Suite à cette description, une validation sur un cas industriel réel est présentée.

2 La méthode D-Sign

La figure 1 décrit, sous la forme d'un réseau de Petri la méthode proposée. 7 activités fondamentales apparaissent. Ces 7 activités peuvent être regroupées selon quatre processus de conception, d'exploitation, d'analyse et d'amélioration. Au sein de D-Sign, nous avons relevé 5 décisions fondamentales (en gras sur le réseau de Petri). Chacun de ces processus et de ces décisions est décrit dans les parties suivantes.

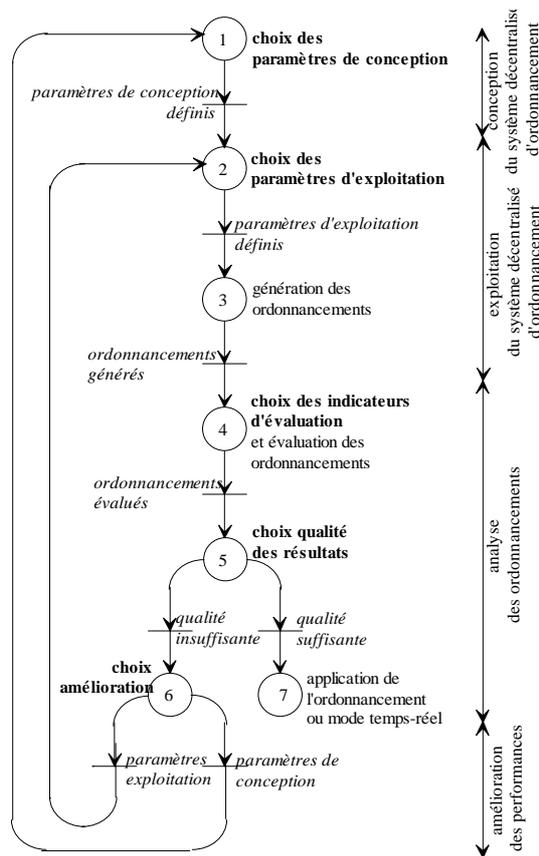


Figure 1. Méthode D-Sign.

2.1 Premier processus: conception d'un système décentralisé d'ordonnement

L'approche décentralisée de l'ordonnement consiste à faire réaliser les sous-spécifications de C par un ensemble non réduit à un singleton d'entités capables de décision (concernant les sous-spécifications à opérer sur les sous-ensembles du {"Quoi"} ou du {"Où"}) et d'information (dans le but d'informer les autres entités de ces décisions, de demander des informations complémentaires, de négocier des remises en question de décision, etc.). Cette approche propose ainsi de réduire la complexité de la spécification globale de l'ordonnement en attribuant à des entités en interaction la capacité de sous-spécifier une partie de l'ordonnement et de faire émerger une ou plusieurs solutions globales.

Ce premier processus a ainsi pour fonction de concevoir un système décentralisé d'ordonnement réactif, système qui sera exploité afin de réaliser, en fonction de paramètres d'exploitation, un ou plusieurs ordonnancements. Les choix à effectuer lors de ce processus portent sur les paramètres de conception de ce système : type de structure, type de décentralisation, type de contrôle, modélisation des composants à ordonner, modélisation des entités, association des entités aux sous-ensembles des {"Quoi"} ou des {"Où"}, etc. Les autres paramètres d'exploitation (choix des règles d'ordonnement, etc.) seront précisés au cours du second processus.

L'approche proposée est basée sur le paradigme de la « résolution distribuée de problème », paradigme qui relève du domaine de l'intelligence artificielle distribuée et qui traite de l'interaction entre entités réactives ou cognitives partageant leurs connaissances et capacités pour résoudre un problème global décomposé en sous-problèmes appelés tâches [ALB 95].

Afin de mettre en évidence les possibilités de paramétrage de conception et d'exploitation et de permettre à terme une analyse de l'impact des paramètres, une (sous-)méthode de conception de système décentralisé doit être définie spécifiquement au sein de ce premier processus. Pour ce faire, nous proposons de nous baser sur le concept d'« Unité de Management Décentralisé » (UMD). Le terme « management » s'applique à tout type de système opérant et est utilisé dans son acceptation la plus large : il peut alors être spécifié plus précisément en terme de gestion, d'ordonnement, de contrôle ou de pilotage par exemple. Nous présentons le concept UMD puis la méthode de conception qui permet de générer un modèle applicatif à partir de ce concept.

2.1.1 Le concept UMD

Une UMD « exploite » ou « adapte » un système opérant (cf. figure 2.a). Ce système opérant peut être soit un modèle d'un ou plusieurs composants physique(s) ou informationnel(s) d'un système réel (hors-ligne) soit directement ce(s) composant(s) (en ligne) ou soit, de manière récursive, une autre UMD. La fonction d'exploitation a pour but de maîtriser l'efficacité du système opérant: les décisions élaborées sont des décisions de commande des moyens à disposition, c'est à dire

visant à l'exploitation du système opérant. La fonction d'adaptation a pour but de maîtriser l'efficacité et la pertinence du système opérant: les décisions élaborées sont des décisions d'adaptation des moyens à disposition, c'est à dire d'adaptation du système opérant. Ceci suppose donc que ce système opérant soit reconceptualisable (i.e., que l'on peut re-spécifier, totalement ou partiellement).

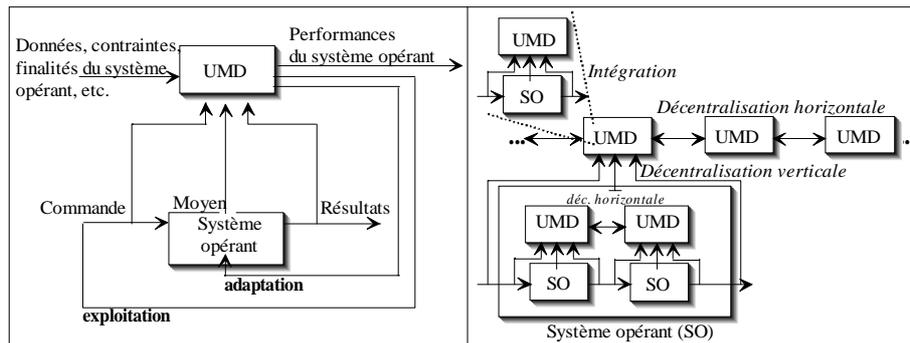


Figure 2.a et b. Concept d'UMD et structure générique.

La structure générique du système est présentée figure 2.b. Certaines connections au niveau des systèmes de pilotage ont été masquées (par exemple, les commandes pour l'exploitation et l'adaptation) afin de ne pas altérer la clarté du schéma. Cette structure fait apparaître trois mécanismes élémentaires de structuration :

- la décentralisation verticale entre UMD et système opérant représentée par des flèches simples orientées vers le haut et qui correspond à la notion réursive supportant les mécanismes de hiérarchisation : un système opérant peut être lui-même une UMD responsable d'un second système opérant ;
- la décentralisation horizontale entre UMD de même niveau représentée par une double flèche horizontale : support des mécanismes d'information, communication, négociation, coopération, etc. ;
- l'intégration d'une UMD au sein du système d'information d'une autre UMD représentée par la zone définie par deux traits pointillés : support des mécanismes de simulation d'un modèle du système opérant, etc.

2.1.2 Proposition d'une méthode de conception de modèle UMD-X

En tant que concept, le concept UMD ne constitue pas un modèle utilisable en soi. Pour ce faire, il faut le spécifier (i.e., l'instancier par rapport à un contexte applicatif) selon une méthode de conception afin d'obtenir un modèle exploitable. Ce modèle spécifié, nous l'appelons UMD-X, X étant à préciser en fonction de ce contexte applicatif. Dans cet article, la fonction de management correspond à une fonction d'ordonnancement ou de pilotage, dans un cadre d'exploitation lorsque les

moyens de production sont déterminés et dans un cadre d'adaptation lorsqu'ils peuvent être partiellement redéfinis (recours à l'intérim, ajout/ suppression de postes, de ressources de production, d'outillages, etc.).

La méthode de conception proposée est résumée en 5 étapes (non détaillée dans le cadre de cet article) :

- étape 1 : spécification fonctionnelle et structuration du système global,
- étape 2 : définition des processus et activités des UMD-X,
- étape 3 : spécification des décisions et informations des UMD-X,
- étape 4 : choix des outils et conception des UMD-X,
- étape 5 : intégration des processus des UMD-X et implémentation.

L'implémentation peut être réalisée soit d'une manière centralisée (par exemple, un unique processeur traitant l'ensemble des entités, dans un cadre de simulation centralisée) soit décentralisée (par exemple, dans un cadre multi-processeurs, distants ou non). Cette capacité à pouvoir simuler de manière centralisée pour simplifier les démarches de conception (paramétrisation, évaluation) puis de physiquement décentraliser chaque UMD-X sur le site (par exemple, connecter une UMD-X à une ressource de production via carte d'acquisition et interface de commande) facilite notamment les phases de validation.

A l'issue de ce processus, le système décentralisé qui va générer les ordonnancements réactifs est conçu. Il reste alors à préciser les valeurs de ses paramètres d'exploitation et à l'exploiter.

2.2 Second processus : exploitation du système

Pour chaque système d'ordonnement conçu, il est nécessaire de définir les valeurs possibles pour les paramètres d'exploitation puis de générer les résultats en fonction des paramètres choisis. Ces valeurs vont permettre de générer la diversité requise des ordonnancements qui pourront alors être évalués. A titre illustratif, dans la partie application de cet article, cette paramétrisation portera essentiellement sur le choix des règles de décision (par exemple, les règles « SPT » ou « LPT » portant sur le temps opératoire) et de leur monotonie (à maximiser ou minimiser).

2.3 Troisième processus: analyse des performances

Ce troisième processus a pour objet d'évaluer globalement les différents ordonnancements générés et de proposer au décideur les paramètres les plus satisfaisants qui vont concourir à la génération d'ordonnements de qualité, selon les critères d'analyse du décideur. Cette proposition est établie à partir d'un compromis multicritère entre plusieurs indicateurs (critères) portant sur les performances globales de chaque ordonnancement : indicateurs ayant trait aux

produits et aux ordres de fabrication (retard, avance, temps de latence, etc.) et indicateurs ayant trait aux ressources de production (équilibre, taux d'occupation, file d'attente, etc.).

Les approches multi-critère et logique floue facilitent la prise en compte des préférences du responsable de l'ordonnancement. En effet, d'une manière naturelle, un décideur prend sa décision en fonction d'indicateurs de performances multiples et contradictoires sans cependant pouvoir aisément quantifier les importances relatives entre ces indicateurs (par exemple, sous forme de poids).

Dans ce cadre, une tâche primordiale consiste à définir l'importance relative de ces critères sous réserve que cette importance relative corresponde bien aux préférences du décideur. Cette notion est utilisée dans la majorité des méthodes proposées dans le domaine de l'aide multicritère à la décision (AMCD). Elle vise à distinguer le rôle de chaque critère dans l'élaboration des préférences globales. Cependant, dans une situation décisionnelle réelle, connaître les préférences du décideur et déterminer les poids des critères est bien souvent une tâche très délicate. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été élaborées pour affecter des poids aux critères en adoptant des optiques et points de vues variés, [SAA 80], [YAG 81], [YAR 98], [NUT 80], [COO 75]. Ces différentes méthodes peuvent être réparties en deux principaux groupes [MOU 92].

Les méthodes dites « directes » demandent une évaluation directe des paramètres d'importance sans référence à aucune Procédure d'Agrégation Multicritère (PAMC) de sorte que le décideur, pour évaluer les poids des critères, ne peut se baser que sur sa perception intuitive de l'importance relative des critères. Par exemple, Fargier propose au décideur de classer les objectifs en affectant à chacun un degré de priorité ω dans $[0,1]$, [FAR 93]. Plus la valeur de ω est élevée plus le critère est important. Yager adopte une méthode similaire à celle de Fargier mais propose des termes linguistiques selon l'ordre linéaire suivant pour juger de l'importance des critères [YAG 81], [YAG 82]: Parfait \geq très élevé \geq élevé \geq moyen \geq médiocre \geq très médiocre \geq non important. Le décideur choisit alors entre ces termes pour exprimer ses préférences vis à vis des différents critères. Dans ce cadre, nous estimons qu'il est difficile pour un expert humain de formuler objectivement ses préférences en affectant directement des poids relatifs aux critères. Obliger ce dernier à fournir une telle information peut engendrer des réponses incohérentes si l'expert ne peut pas donner cette information correctement.

Les méthodes dites « indirectes » ont été conçues en relation avec une PAMC particulière. Le décideur n'a pas à fournir une information directe sur l'importance relative des critères mais une information à partir de laquelle il est possible de déduire des valeurs pour les paramètres d'importance en effectuant des inférences à partir de la règle d'agrégation utilisée. Ces informations se résument le plus souvent sous la forme de comparaisons d'actions spécifiques. Selon ces méthodes, le décideur ne peut pas déterminer les poids des critères. Par contre, il s'avère nécessaire d'extraire de l'expert l'information nécessaire pour formuler ces préférences et pour interpréter les poids des objectifs [SEN 98]. Par exemple, la

procédure développée par Saaty [SAA 80] et restituée par Ibrahim et Ayyub [IBR 92] est largement utilisée en ordonnancement [YAR 98], [NAS 98], [SLA 94]. Selon lui, l'expert ne peut pas associer des valeurs aux importances relatives des critères, mais par contre il peut effectuer des comparaisons par paires de critères en ayant recours à un vocabulaire limité. Saaty justifie le choix d'attributs en langage naturel par le fait que l'expert humain est capable de faire une distinction quantitative seulement entre cinq attributs. Les comparaisons entre paires de critères sont présentées au décideur en termes d'une description en langage naturel tandis que les réponses sont interprétées sur une échelle numérique allant de 1 à 9, cf. tableau 1.

Cette échelle numérique est utilisée comme telle pour déduire de l'importance relative des critères. A chaque couple d'objectifs ou critères (O_i , O_j) est associée une importance relative notée a_{ij} de O_i par rapport à O_j . Cette valeur est interprétée de la façon suivante : O_i est a_{ij} fois plus important que O_j .

Importance relative	Correspondance de la valeur pour l'opérateur
1	importance égale
3	importance faible de l'une sur l'autre
5	importance essentielle ou forte
7	importance très forte ou démontrée
9	importance absolue
2,4,6,8	valeurs intermédiaires entre deux valeurs de jugement adjacentes

Tableau 1. Table d'importance relative de Saaty.

Dans le cas d'un problème de décision à m critères différents, les m^2 paires de critères donnent une matrice carrée de dimension m^2 dont les coefficients vérifient les relations suivantes : $\forall i, j \in \langle 1, m \rangle$, $a_{ii} = 1$, $a_{ij} = 1/a_{ji}$ et $a_{ij} = a_{ik} * a_{kj}$.

Les poids des différents critères sont ensuite déduits à partir des valeurs propres de cette matrice. Cette approche permet au décideur d'exprimer facilement ses préférences par rapport à l'ensemble des critères par des termes linguistiques. Par contre, on considère que le fait de hiérarchiser ou de transformer cette préférence en poids est une tâche délicate. En effet, l'interprétation mathématique de ces comparaisons, un critère est un peu plus important qu'un autre, ne signifie pas que ce critère soit forcément 3 fois plus important dans la prise de décision. Il n'est ainsi pas évident de formuler la relation \gg (plus important que) donnée par l'expert, même en utilisant l'approche préconisée par Saaty : cette représentation est simple mais est-elle fidèle à l'ordre de préférence voulu effectivement par l'expert ? Il est clair que la quantification directe des jugements de l'expert peut mener à une incohérence entre les comparaisons données par ce dernier et les valeurs numériques qui leurs sont associées.

En conclusion, on constate que deux difficultés sont souvent négligées :

- les valeurs attribuées à des paramètres ne prennent une signification qu'en liaison avec le modèle d'agrégation qui les utilise,
- d'un point de vue théorique, très peu d'auteurs se sont attachés à donner une définition formelle précise de la notion d'importance relative des critères.

Dans ce cadre, l'expression floue des critères convient particulièrement bien pour la modélisation, à partir du moment où la notion d'importance peut être traduite dans un format facile à comprendre par les experts et n'impose pas de quantifier les pondérations. Cette approche contribue par conséquent à répondre au problème de robustesse des résultats par rapport aux préférences des décideurs. Les parties suivantes décrivent le modèle proposé. Il faut noter que, préalablement à l'utilisation de ce modèle, une analyse doit être effectuée afin d'éliminer les ordonnancements dominés sur l'ensemble des indicateurs pour ne laisser que les ordonnancements non Pareto dominés.

2.3.1 Importance floue des critères

En considérant un problème de décision où m critères différents O_1, O_2, \dots, O_m doivent être pris en compte, le principe de base de notre approche consiste à demander au décideur de comparer entre les paires de critères en se référant aux termes linguistiques suivants : {plus important que, d'égale importance, moins important que}. On classe ensuite les critères en trois sous-ensembles flous définissant l'importance floue des critères: critères importants, critères d'importance moyenne et critères d'importance médiocre [GZA 00]. Par conséquent, les poids des critères n'ont pas à être calculés, une comparaison entre les paires de critères est uniquement requise : pour deux objectifs O_i et O_j , le décideur juge que O_i est plus important que, égal à ou moins important que O_j . Les réponses à ces comparaisons peuvent être écrites dans une matrice carrée de dimension $m \times m$ $(a_{ij})_{1 \leq i, j \leq m}$, avec a_{ij} importance relative correspondant à la priorité du critère qui est définie de la manière suivante :

Si O_i est plus important que O_j , alors $a_{ij}=1$.

Si O_i est moins important que O_j , alors $a_{ij}=-1$.

Si O_i est à égale importance que O_j , alors $a_{ij}=0$.

Les importances relatives a_{ij} , sont ainsi reliées par les relations suivantes :

$\forall i, j \in \langle 1, m \rangle$, $a_{ii} = 0$, $a_{ij} = -a_{ji}$, si $a_{ij} = 1$ et $a_{jk} = 1$ alors $a_{ik} = 1$ et si $a_{ij} = -1$ et $a_{jk} = -1$ alors $a_{ik} = -1$. Ces relations ont pour effet de réduire le nombre des comparaisons demandées au décideur.

Nous associons alors à chaque critère O_i un facteur d'importance f_i qui est défini par $f_i = \frac{N_i^+ + N_i^0 - I - N_i^-}{m - I}$, tel que:

$$N_i^+ = \sum_{j \in \langle 1, n \rangle / a_{ij} = 1} a_{ij} : \text{nombre des critères moins importants que } O_i$$

$$N_i^0 = \sum_{j \in \langle 1, n \rangle / a_{ij} = 0} (1 + a_{ij}) : \text{nombre des critères à égale importance que } O_i.$$

$$N_i^- = \sum_{j \in \langle 1, n \rangle / a_{ij} = -1} -a_{ij} : \text{nombre des critères plus importants que } O_i.$$

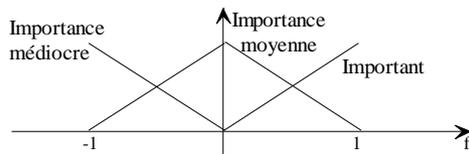
f_i est par conséquent dans l'intervalle $[-1, 1]$. Plus f_i est proche de 1, plus le critère O_i est important et plus f_i est proche de -1 , plus l'importance du critère O_i est médiocre. L'importance d'un critère est caractérisée par les trois classes d'évaluation suivantes, critères importants, critères d'importance moyenne et critères d'importance médiocre. Chaque classe est caractérisée par une fonction d'appartenance :

$$\mu_A: X \rightarrow [0, 1]$$

$$x \rightarrow \mu_A(x)$$

Pour chaque critère O_i , $\mu_A(O_i)$ est interprétée comme le degré d'appartenance de C_i à l'ensemble flou A.

Le degré d'appartenance de chaque critère O_i à respectivement le sous-ensemble flou des critères importants $\mu_{\text{important}}(O_i)$, le sous-ensemble flou des critères de moyenne importance $\mu_{\text{importance moyenne}}(O_i)$ et le sous-ensemble flou des critères d'importance médiocre $\mu_{\text{importance médiocre}}(O_i)$ sont alors calculés comme suit (tableau 2).



Signe de f_i	Négatif	nul	Positif
$\mu_{\text{important}}(O_i)$	0	0	f_i
$\mu_{\text{importance moyenne}}(O_i)$	$1 + f_i$	1	$1 - f_i$
$\mu_{\text{importance médiocre}}(O_i)$	$-f_i$	0	0

Tableau 2. Fonction d'appartenance.

2.3.2 Sélection Multicritère Floue

Supposons que nous disposions d'un ensemble S de n solutions différentes (encore appelées alternatives ou candidates) du système $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n\}$. Dans le cas (rare) où il existe une ou plusieurs solutions qui surclasse(nt) toutes les autres, le problème est résolu. Dans le cas contraire, le problème de décision revient alors à sélectionner parmi cet ensemble de solutions proposé à l'expert, la solution réalisant le meilleur compromis entre les m critères O_i en respectant les préférences de celui-ci. La sélection multicritère floue de la meilleure solution est une méthode dédiée à cette action. La première étape de la sélection multicritère floue est une comparaison floue par paire de solutions : une solution S_i peut être meilleure que, équivalente à ou moins bonne qu'une solution S_j . La seconde étape est l'algorithme de sélection flou qui va permettre le choix de la solution la plus satisfaisante.

2.3.2.1 Comparaison floue des paires de solutions

Pour un objectif O_k et une solution S_i , la satisfaction de cet objectif O_k par la solution S_i est représentée par une valeur réelle x_{ik} définie entre 0 et 1 :

$x_{ik}=0$ signifie que S_i ne satisfait pas du tout O_k .

$x_{ik}=1$ signifie que O_k est complètement satisfait par S_i .

x_{ik} est entre 0 et 1, signifie que S_i satisfait partiellement O_k .

Pour convertir des nombres réels en degrés de satisfaction, on emploie une méthode basée sur la comparaison relative des valeurs d'attribut pour une décision donnée. Supposons qu'une meilleure satisfaction corresponde à une valeur plus élevée (plus petite) de l'attribut lorsqu'on cherche à maximiser (minimiser) un critère. Pour un critère donné O_i ($i \in \{1, 2, \dots, m\}$), un nombre dans $[0, 1]$ peut être facilement calculé en utilisant les fonctions d'appartenance suivantes (figure 3). Si $[v_{i,\min}, v_{i,\max}]$ est l'intervalle limitant les valeurs obtenues par l'ensemble des solutions S pour l' i ème critère O_i , on définit une fonction d'appartenance triangulaire: la ligne continue (pointillée) représente le cas où l'on cherche à maximiser (minimiser) un critère.

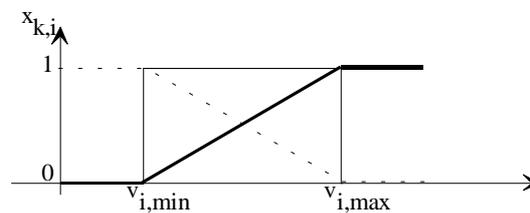


Figure 3. Fuzzification du degré de satisfaction.

Soient S_i et S_j deux solutions du problème. Soient $Sat_{(O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_m)}(S_j)$ et $Sat_{(O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_m)}(S_i)$ les vecteurs des degrés de satisfaction associés respectivement à S_i et S_j . Comme les deux solutions ne satisfont pas chaque critère avec le même degré, on compare $Sat_{(O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_m)}(S_j)$ et $Sat_{(O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_m)}(S_i)$. Notons $\Delta_{important}(S_i, S_j)$, la comparaison relative de S_i et S_j par rapport à l'ensemble des critères importants:

$$\Delta_{important}(S_i, S_j) = \sum_{\text{tous les critères}} \mu_{important}(O_k)(x_{ik} - x_{jk}), \quad \mu_{important}(O_k) \text{ est le degré}$$

d'appartenance du critère O_k à l'ensemble flou des critères importants.

Nous jugeons que S_i est meilleure que, égale à ou moins bonne que S_j par rapport à l'ensemble des critères importants en utilisant une α -coupe, $\alpha \in [0, 1]$, de la manière suivante:

Si $\Delta_{important} \geq \alpha$ alors S_i améliore l'ensemble des critères important et l'on définit $comparaison_{important}(S_i, S_j) = M$.

Si $\Delta_{important} \leq -\alpha$ alors S_i est moins bonne que S_j , $comparaison_{important}(S_i, S_j) = m$.

Si $-\alpha < \Delta_{important} < \alpha$ alors S_i est égale à S_j et $comparaison_{important}(S_i, S_j) = E$.

De la même façon, nous calculons $\Delta_{importance\ médiocre}(S_i, S_j)$ et $\Delta_{importance\ moyenne}(S_i, S_j)$:

$$\Delta_{importance\ médiocre}(S_i, S_j) = \sum_{\text{tous les critères}} \mu_{importance\ médiocre}(O_k)(x_{ik} - x_{jk})$$

$$\Delta_{importance\ moyenne}(S_i, S_j) = \sum_{\text{tous les critères}} \mu_{importance\ moyenne}(O_k)(x_{ik} - x_{jk})$$

En utilisant la même α -coupe, nous déduisons les comparaisons relatives pour l'ensemble flou des critères d'importance médiocre $comparaison_{importance\ médiocre}(S_i, S_j)$ et pour l'ensemble flou des critères d'importance moyenne $comparaison_{importance\ moyenne}(S_i, S_j)$. Ces trois comparaisons sont inférées et fuzzifiées afin d'obtenir une comparaison globale par rapport à la base de règles floues suivantes:

Si $comparaison_{important}(S_i, S_j) = M$ et $comparaison_{importance\ moyenne}(S_i, S_j) = M$ et $comparaison_{non\ important}(S_i, S_j) = M$ alors S_i est meilleure que S_j .

Si $comparaison_{important}(S_i, S_j) = M$ et $comparaison_{importance\ moyenne}(S_i, S_j) = E$ et $comparaison_{importance\ médiocre}(S_i, S_j) = m$ alors S_i est meilleure que S_j .

Si $comparaison_{important}(S_i, S_j) = E$ et $comparaison_{importance\ moyenne}(S_i, S_j) = E$ et $comparaison_{importance\ médiocre}(S_i, S_j) = m$ alors S_i est égale à S_j .

La comparaison globale est donnée avec les notations suivantes dans le tableau 3:

comparaison_{important}(S_i, S_j) = λ S_i est meilleure que S_j .
 comparaison_{importance moyenne}(S_i, S_j) = β S_i est égale à S_j .
 comparaison_{importance médiocre}(S_i, S_j) = γ S_i est moins bonne que S_j .

$\lambda\beta$	BB	BE	BW	EB	EE	EW	WB	WE	WW
γ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
B	MMM	MEM	MmM	EMM	EEM	EmM	mMM	mEM	mmM
E	MME	MEE	MmE	EME	EEE	EmE	mME	mEE	mmE
W	MMm	MEm	Mmm	EMm	EEm	Emm	mMm	mEm	mmm

Tableau 3. Comparaison globale.

2.3.2.2 Algorithme de sélection floue

L'algorithme de sélection floue est alors le suivant :

Etape 1:
 Soit s un ensemble de solutions disponibles du système : $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n\}$
 $S_M = \emptyset$; $i \leftarrow 1$; $comp \leftarrow$ meilleure; $L_E = \emptyset$; {ensemble de solutions équivalentes à S_M }

Etape 2:
 $S_M \leftarrow S_i$;
 $s \leftarrow s - \{ S_i \}$;

Etape 3:
 Tant que $s \neq \emptyset$ faire début.
 $i \leftarrow i + 1$;
 $comp \leftarrow$ compare(S_M, S_i) (en utilisant l'importance floue des critères et la comparaison floue des paires de solutions).
 Si ($comp =$ Meilleure) alors $S_M \leftarrow S_M$
 Sinon si ($comp =$ Egale) alors $L_E \leftarrow L_E \cup \{S_i\}$
 Sinon si ($comp =$ Moins bonne) alors début $S_{best} \leftarrow S_i$
 Eliminer tous les S_j dans L_E tels que $compare(S_{best}, S_j) =$ meilleure;
 Fin si
 $s \leftarrow s - \{S_i\}$
 Fin tant que
 Afficher(ordonnancement donnant le meilleur compromis entre les critères)
 Afficher(ensemble des ordonnancements équivalentes à S_M, L_E)
 Fin.

A la fin de ce processus, le décideur dispose ainsi d'un ordonnancement satisfaisant en fonction de son ordre de préférences sur les critères (indicateurs

globaux). Il peut alors déduire les paramètres de conception et d'exploitation qui vont générer ces types d'ordonnements.

Dans le cas où les performances en simulation sont jugées satisfaisantes, le décideur peut alors passer de la simulation à un ordonnancement réactif temps réel (sur site) en implantant le système décentralisé conçu et en fixant les valeurs des paramètres de conception et d'exploitation qui proposent les résultats les plus satisfaisants. En outre, étant également donnée la finesse du modèle du système de production, l'ordonnement généré est réaliste. Ce dernier peut alors être considéré comme un ordonnancement prévisionnel fiable (planifié), mais certainement sous-performant par rapport à un ordonnancement statique.

2.4 Quatrième processus : amélioration des performances

L'amélioration des performances fait suite à la détection éventuelle d'une sous-performance critique des ordonnancements établis, même concernant a priori l'ordonnement le plus satisfaisant qui émerge de l'ensemble des ordonnancements établis, et ce, par rapport à un référentiel établi. Il est courant que ce référentiel soit constitué d'une borne inférieure sur un critère établi à partir d'une méthode d'ordonnement dont le comportement ou les résultats sont reconnus de qualité (par exemple, les algorithmes génétiques ou la programmation par contraintes). En contrepartie, il faut prendre en compte le fait que les hypothèses sont généralement plus réductrices que dans le cas de l'approche décentralisée. Les résultats obtenus avec l'approche décentralisée seront ainsi sensiblement de moins bonne qualité. Il est également possible de vérifier les performances de la méthode d'ordonnement par rapport aux bancs d'essais disponibles (tels que la bibliothèque OR-Lib).

Lorsque cette comparaison a eu lieu, le décideur peut soit opter pour la validation des paramètres de conception et d'exploitation, ce qui conclut la méthode globale, soit décider de revoir dans l'ordre:

- les paramètres d'exploitation en considérant d'autres paramètres ou en affinant des paramètres existants qui semblent donner des résultats satisfaisants (voisinage),
- à défaut, les paramètres de conception.

Ce processus, faiblement structuré, n'est pas pour l'instant automatisé, mais il peut être envisageable de procéder à une telle automatisation en exploitant notamment les concepts issus du raisonnement à base de cas, ou encore les plans d'expérience ou les systèmes experts. Cette perspective nous permettra d'intégrer des mécanismes d'auto-adaptation aux différents contextes (système de production, produits, objectifs) dans une démarche d'amélioration continue des performances.

La partie suivante détaille l'application de la méthode globale à un atelier de production.

3 Exemple de validation de la méthode D-Sign

3.1 Description du cas d'étude

Le cas d'étude porte sur un atelier flexible de finition d'une usine spécialisée dans la fonderie de précision. La structure de production globale comporte deux parties. La première partie présente des caractéristiques de type « flow shop » durant laquelle les pièces métalliques sont formées en grappe selon la méthode de la cire perdue et, en fin de ligne, grossièrement tronçonnées. La seconde partie présente des caractéristiques de type « job shop » (atelier flexible de finition): les produits semi-finis sont alors ébavurés, sciés, soumis à traitement thermique, grenailés, sablés, contrôlés (contrôle visuel et qualité), calibrés, emballés, expédiés. Certaines étapes peuvent être répétées plusieurs fois de manière statique selon la gamme opératoire ou dynamique selon les besoins (suite à un contrôle négatif par exemple ou à des compléments de spécification du bureau d'étude ou des clients). Cet atelier comporte 20 ressources de production éventuellement redondantes plus un sous-traitant pour les opérations spéciales et certains traitements thermiques.

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. Les ordres de fabrication ont été élaborés à partir de plusieurs gammes de fabrication réelles, comportant en moyenne 12 opérations chacune. L'étude a porté sur 30 ordres de fabrication, ce qui correspond ainsi à un problème d'ordonnancement 20 ressources, 360 opérations.

3.2 Premier processus

3.2.1 Etape 1 : spécification fonctionnelle et structuration du système global

Nous proposons de spécifier les ordonnancements à partir d'une approche de type « entité/ ressource ». Dans ce cadre, le concept UMD-X est instancié en modèle UMD-RP (Ressource de Production) où chaque UMD-RP est responsable d'un sous-ensemble de ressources de production. Nous considérons que ce sous-ensemble est un singleton, autrement dit, à une UMD-RP correspond un système opérant composé d'une seule ressource de production, ce qui signifie qu'il y aura autant d'UMD-RP que de ressources de production et qu'aucun conflit de ressource ne peut survenir (l'impact de regroupements potentiels constitue une des perspectives de nos travaux). Ces entités possèdent ainsi un modèle de ces ressources en fonction du degré de granularité souhaité par rapport au réalisme du modèle (contraintes). Ceci correspond à une décentralisation à la fois fonctionnelle (par rapport aux ressources en tant qu'entités ayant pour fonction la transformation dans le temps, la forme ou l'espace d'un produit) et spatial (par rapport à la localisation physique des ressources).

Nous supposons également que les moyens de production sont entièrement déterminés, la fonction d'adaptation n'est ainsi pas développée.

Enfin, nous considérons uniquement dans le cadre de cet article une structure totalement distribuée, sans niveau supérieur de hiérarchie présent. Une structure distribuée-supervisée a également été définie mais n'est pas décrite plus en avant.

Par conséquent, le modèle et l'architecture d'un système à base d'UMD-RP est présenté figure 4. Le système décentralisé comportera ainsi 21 UMD-RP.

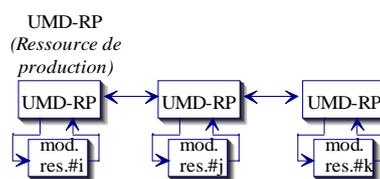


Figure 4. Structure distribuée des UMD-RP.

3.2.2 Etape 2 : définition des processus et activités des UMD-RP

Dans l'objectif de spécifier l'ordonnancement réactif dans un cadre décentralisé, nous proposons de définir et de modéliser deux processus :

- le premier dit « d'ordonnancement » : sa fonction est de spécifier au niveau d'une UMD-RP une allocation en simulant le placement d'une opération à l'aide d'un modèle comportemental des ressources de production composant le système physique et en relevant, suite à cette simulation, les dates de début et de fin de l'opération. Ce modèle, décrit en réseau de Petri, intègre les modes de marche et d'arrêt de la ressource et les spécificités fonctionnelles de celle-ci. Dans le cadre de cet article, ce modèle supporte en outre les contraintes suivantes : prise en compte des temps opératoires variables selon les ressources, prise en compte des temps de transfert et de préparation, disponibilité variable des opérateurs et des outillages, travail à capacité finie, capacité de stockage finie, incompatibilité possible entre produits et opérations, gestion dynamique des données et de l'environnement, possibilité de définir des gammes dynamiques ou alternatives, prise en compte d'aléas. Ce processus est activé dès qu'une opération a été reçue par une UMD-RP pour ordonnancement.

- le second dit « d'allocation » : sa fonction est de répartir entre UMD-RP les différentes opérations à ordonnancer, en fonction des objectifs de production, de la gamme opératoire et des dates de disponibilité et de besoin des ordres de fabrication. Ce processus permet ainsi d'intégrer les contraintes de précédence entre opérations et les contraintes de faisabilité d'opération sur ressource. Il est activé dès qu'une opération vient d'être ordonnancée et que l'ordre de fabrication n'est pas encore complètement ordonnancé.

En cas de contraintes spécifiques concernant le transport (par exemple, système filo-guidé, convoyeur à accumulation, chaîne logistique, entrepôts, distribution, etc.), l'ajout d'une UMD-RP dont le système opérant est le système de convoyage (UMD-SC) doit être envisagé pour modéliser ces contraintes de transport et optimiser éventuellement les parcours. Dans ce cas, un troisième processus de transfert doit être défini pour compléter le processus d'allocation (en phase de transfert).

Le processus d'allocation est le plus complexe car il met en œuvre au moins deux UMD-RP, dont un demandeur et au moins un contractant (récepteur). Ce processus est un processus de type concurrentiel. Il est fondé sur le principe largement utilisé du réseau à contrat [SMI 80]. Il se base sur l'utilisation de six primitives de communication qui sont « demande », « acceptation », « réservation », « relaxation », « acquittement » et « transfert ». Ce processus est décrit en six étapes :

1- Lorsque l'UMD-RP *i* vient d'ordonnancer localement une opération *O* suite à la simulation du modèle de la ressource, elle envoie sur le médium de communication une DEMANDE afin de répertorier les UMD-RP susceptibles d'ordonnancer localement l'opération suivante *O*' selon l'ordre de fabrication établi en fonction de la gamme opératoire.

2- Les UMD-RP capables de satisfaire la demande (c'est à dire celle dont la ressource de production est capable d'effectuer l'opération *O*') renvoient alors une ACCEPTANCE à l'UMD-RP *i* afin que celle-ci choisisse l'UMD-RP la mieux adaptée.

3- Lorsque l'UMD-RP *i* a sélectionné l'UMD-RP *j* contractante, elle lui envoie une RESERVATION afin que l'UMD-RP *j* se réserve pour l'opération à ordonnancer.

4- L'UMD-RP *i* relaxe (RELAXATION) en parallèle les autres UMD-RP qui n'ont pas été sélectionnées (mais qui avaient effectivement renvoyé une ACCEPTANCE à l'UMD-RP *i*).

5- L'UMD-RP *j* qui a été sélectionnée par l'UMD-RP *i* retourne un ACQUITTEMENT après avoir reçu la RESERVATION afin de stipuler qu'elle confirme l'établissement du contrat.

6- L'UMD-RP *i* fait alors une demande de TRANSFERT. L'opération à ordonnancer est alors transmise, avec l'ordre de fabrication correspondant, à l'UMD-RP *j*.

Les deux processus d'ordonnancement et d'allocation sont asynchrones (ils sont réalisés en parallèle et éventuellement en même temps par chaque UMD-RP) et entre UMD-RP (les états des UMD-RP évoluent indépendamment des autres UMD-RP et chaque UMD-RP peut recevoir plusieurs demandes de contrat tout en ayant déjà envoyé plusieurs acceptances par exemple). C'est pourquoi, afin de mieux gérer

la complexité induite par cet asynchronisme fort, des états d'attente et des graphes d'état décrivant l'évolution entre ces états ont été préalablement définis. Ils ont permis d'élaborer les réseaux de Petri des deux processus et ont également permis d'intégrer des mécanismes de recouvrement en cas de problème de communication notamment. La figure 5 détaille les réseaux de Petri décrivant ces deux processus. Les mécanismes de recouvrement n'ont pas été représentés pour éviter toute surcharge et conserver la lisibilité des réseaux.

3.2.3 étape 3 : spécification fonctionnelle des UMD-RP

Les deux processus introduits précédemment nous permettent de mettre en évidence les besoins en termes de décision et d'information. Cette partie décrit ces deux aspects.

3.2.3.1 Fonctions de décision

Les réseaux de Petri précédents ont permis d'identifier trois décisions de type « choix »:

- Décision 1 : Choix de l'UMD-RP qui sera responsable de l'ordonnancement d'une prochaine opération,
- Décision 2 : choix du prochain ordre de fabrication parmi les ordres de fabrication alloués à l'UMD-RP pour lesquels l'opération en cours doit être ordonnancée et placement dans le temps soit au plus tôt (de manière absolue), soit au plus juste (de manière relative à la date de besoin) de l'opération en cours (ceci est déterminé automatiquement en fonction de l'objectif global de production, soit de type « au plus tôt », soit de type « juste à temps »).
- Décision 3 : Choix du prochain ordre de fabrication dont l'opération courante sera ordonnancée par une UMD-RP disponible.

Il faut noter qu'une quatrième décision serait identifiée dans le cas où un système opérant serait composé de plusieurs ressources de production. Cette décision porterait alors sur le choix de la ressource sur laquelle l'opération serait ordonnancée. Ces différentes décisions sont prises par maximisation ou minimisation d'une règle parmi les différentes règles proposées au décideur. Ces règles formeront les paramètres d'exploitation. Une première liste est proposée dans le tableau 4. Certaines règles ont un sens pour plusieurs de ces décisions, d'autres sont spécifiques à un seul type de décision. Par exemple, la première règle n'a de sens que pour la décision n°1 car elle n'a de sens que lorsque l'on compare les différentes files d'attentes des UMD-RP ayant renvoyé une acceptance.

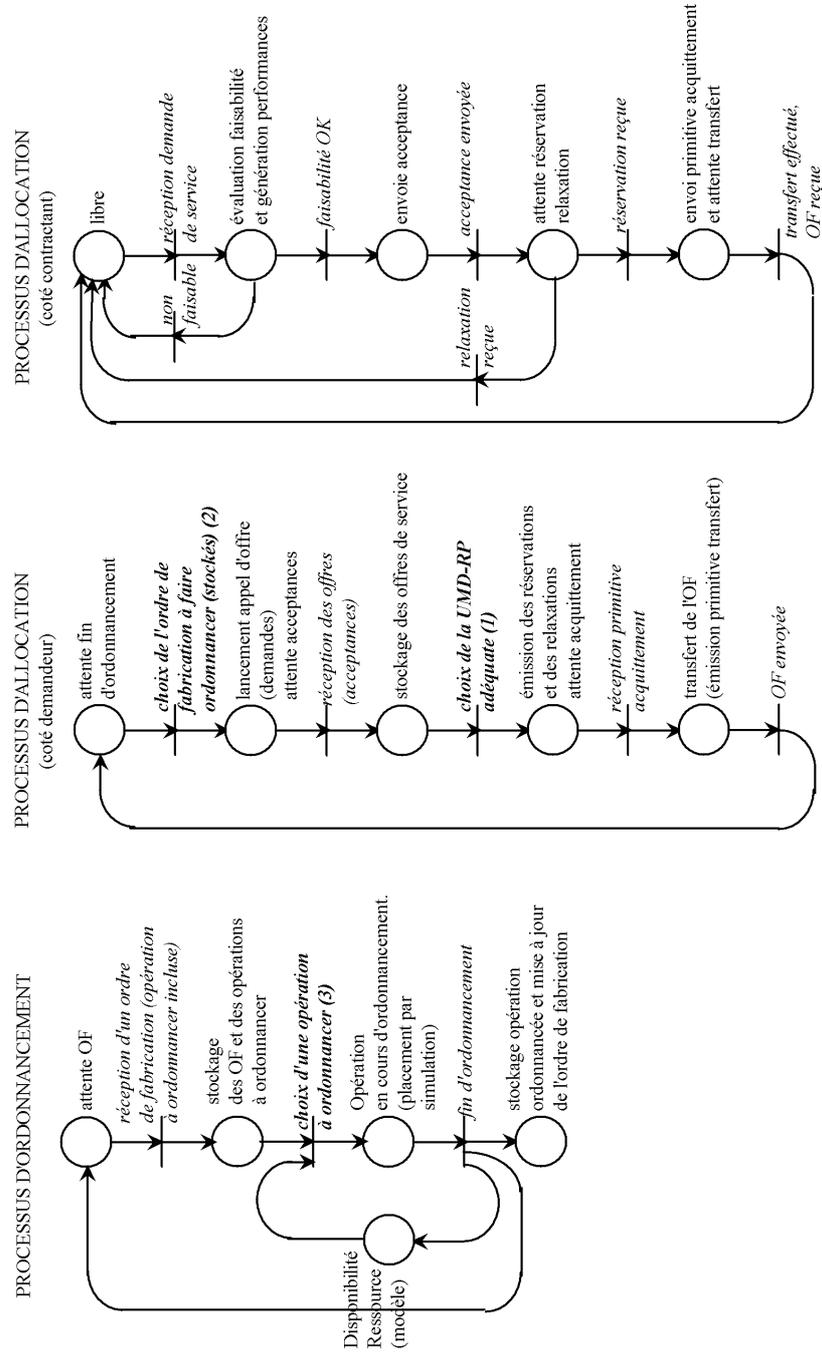


Figure 5. Réseaux de Petri des processus d'ordonnancement et d'allocation.

<i>Règle de décision</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Décision 1</i>	<i>Décision 2</i>	<i>Décision 3</i>
<i>1: Nombre d'opérations en attente</i>	unitaire	X		
<i>2: Temps de transport</i>	Temps	X		
<i>3: Qualité, fiabilité de la ressource</i>	Probabilité	X		
<i>4: Coût de production</i>	Monétaire	X		
<i>5: Prochain temps libre</i>	Temps	X		
<i>6: Nombre d'opérations ordonnancées</i>	unitaire	X		
<i>7: Temps cumulé de disponibilité</i>	Temps	X		
<i>8: Date d'arrivée opération</i>	Temps		X	X
<i>9: Temps opératoire</i>	Temps	X	X	X
<i>10: Durée des opérations restantes pour réaliser l'ordre de fabrication</i>	Temps	X	X	X
<i>11: Nombre d'opérations restantes pour réaliser l'ordre de fabrication</i>	unitaire	X	X	X
<i>12: Date de besoin de l'ordre de fabrication</i>	Temps	X	X	X
<i>13: Marge disponible pour un OF</i>	Temps	X	X	X

Tableau 4. Règles de décision.

3.2.3.2 Fonction d'information

En fonction des décisions à prendre, les informations doivent porter sur:

- le déclenchement des processus décisionnels précédents (arrivée d'un ordre de fabrication, fin d'ordonnancement d'une opération, occurrence d'une panne, etc.) ;
- le suivi des informations échangées (gestion des états d'attente, des procédures de recouvrement, etc.) ;
- la gestion des informations locales (ordonnancement en cours, modèle des ressources de production composant le système opérant, etc.).

Concernant plus particulièrement les fonctions de déclenchement, nous nous sommes basés sur [PES 98] pour élaborer une typologie des événements, un typage en fonction de leur occurrence et une liste triée par ordre de priorité :

- selon une méthode lexicographique à deux critères concernant le processus d'allocation: un premier critère qui porte sur la nature du message (priorité élevée : acceptation, réservation, relaxation, et acquittement priorité faible : demande, transfert) et un second sur la date d'arrivée du message.
- selon uniquement la date d'arrivée du message concernant le processus d'ordonnancement (chargement/ déchargement d'opération, etc.).

3.2.4 Etape 4 : conception des UMD-RP

La figure 6 décrit la conception des sous-systèmes composant l'UMD-RP. Les sous-systèmes de décision « intrant », « ressource » et « extrant » se définissent par rapport aux trois décisions identifiées (intrant pour la décision 1, ressource pour la décision 4 (le cas échéant) et extrant pour les décisions 2 et 3).

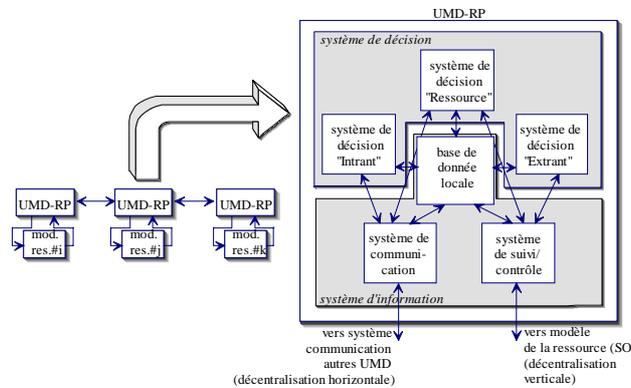


Figure 6. Conception des sous-systèmes composant chaque UMD-RP.

Les sous-systèmes d'information (communication et suivi/contrôle) sont structurés de manière identique : un sous-système intrant pour gérer les informations reçues, un sous-système de traitement (typage, mise à jour des listes triées, procédure de réaction par rapport aux événements, évolution des états d'attente, etc.) et un sous-système extrant pour générer une information en sortie vers les autres UMD-RP ou vers le système opérant. Un système de base de données local contient toute information utile au cours des processus d'allocation et d'ordonnancement et mémorise les ordonnancements successifs.

3.2.5 Etape 5 : mise en œuvre et intégration

L'implémentation a été réalisée en C++ à l'aide du formalisme objet. Plus globalement concernant la méthode de conception, l'approche objet nous permet surtout de supporter les principes d'héritage et de polymorphisme entre les UMD-X et les UMD-RP et d'intégrer sans contrainte de codage les modèles des ressources de production. Cette approche permet également d'intégrer aisément des mécanismes de simulation de perturbation permettant des tests de type « what if ? » portant sur les occurrences de pannes, d'ordre urgent, de limitation de capacité, etc. dans une démarche de simulation du pilotage en fonctionnement dégradé en complément à la démarche d'ordonnancement réactif en fonctionnement normal.

Plusieurs implantations différentes ont été réalisées : une première centralisée afin de simuler et valider les protocoles et le bon fonctionnement de l'ensemble et une seconde décentralisée entre plusieurs PC (reliés via internet) afin de vérifier l'absence de blocages éventuels dus aux protocoles et aux spécificités des couches TCP-IP ainsi qu'à la disparition d'un temps universel due à cette décentralisation.

3.3 Second processus

Les règles de décisions que nous allons étudier et qui vont influencer sur les indicateurs de performance sont les suivantes (cf. tableau 4) :

- Décision 1: règles 1, 5 & 6, chacune à maximiser ou à minimiser,
- Décision 2: règles 9, 10, 11 & 13, chacune à maximiser ou à minimiser,
- Décision 3: règles 9, 12 & 13, chacune à maximiser ou à minimiser.

Par conséquent, l'ensemble des ordonnancements possibles est de $8 * 6 * 6$, soit 288 ordonnancements candidats (solutions). La figure 7 décrit deux de ces 288 ordonnancements (le temps est exprimé en seconde, ainsi, un ordonnancement moyen présente une fenêtre temporelle d'une trentaine d'heures). Le meilleur en terme de temps de réalisation est le premier (temps de réalisation : 1857,9 sec).

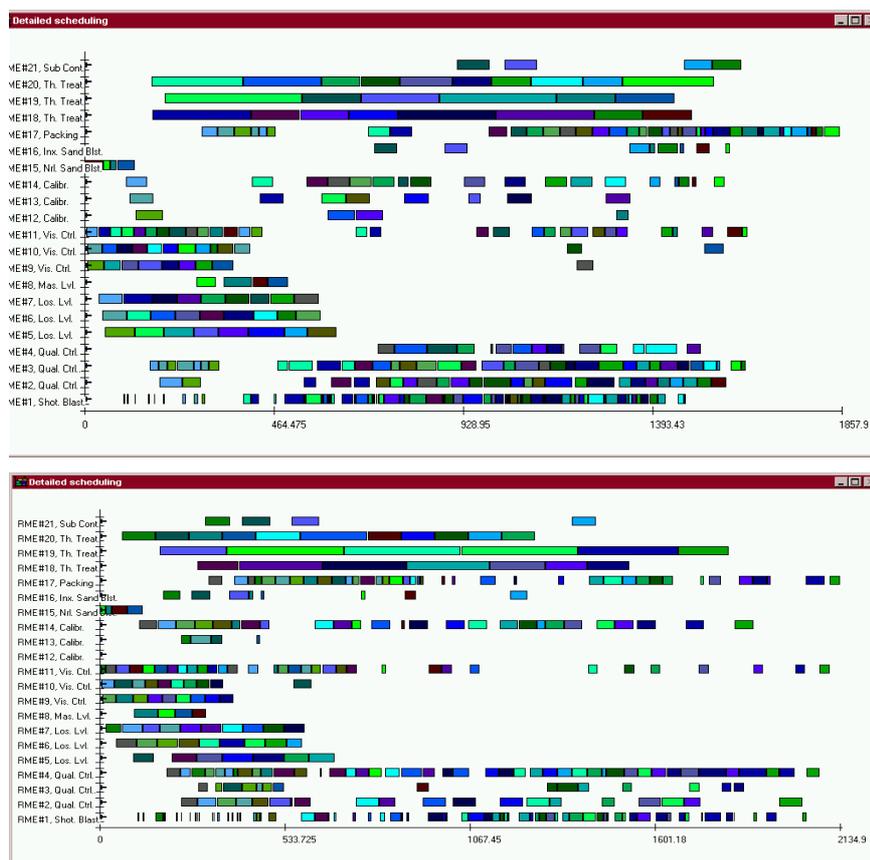


Figure 7. Exemples d'ordonnements générés.

3.4 Troisième processus

Suite à la génération des différents ordonnancements, les indicateurs de performances suivants sont calculés:

- Indicateurs de production par ressource :
 - charge: cet indicateur permet d'identifier les ressources en sous (ressources « inutiles ») ou en surcharge d'activité (ressources « goulets ») et donne une indication quant à l'équilibrage des ressources.
 - coût de production : cet indicateur permet de mettre en évidence l'intérêt d'investissement ou d'évaluer le retour sur investissement d'un achat de ressource.
 - taux d'occupation: cet indicateur permet d'identifier les ressources sous-exploitées ou sur-exploitées. Il est en lien étroit avec le premier indicateur mais la différence se situe au niveau du fait qu'un taux d'occupation élevé ne signifie pas pour autant surcharge de la file d'attente de la ressource, mais peut être une production « juste à temps » par rapport aux arrivées des ordres de fabrication et des départs des produits.
- Indicateurs de production par ordre de fabrication :
 - retard/avance par rapport à la date de besoin. Cet indicateur est l'indicateur privilégié dans un contexte de production « juste à temps ».
 - temps de fin de production. Cet indicateur est couramment utilisé, notamment sous sa forme Cmax (temps de réalisation de l'ordonnancement) qui conditionne de très nombreux autres indicateurs et qui est très pertinent notamment dans un contexte de production au plus tôt notamment.
 - ratio de latence : cet indicateur mesure le temps passé en opération par rapport aux temps d'attente et de transfert. Il est très utile dans le cas où l'on cherche à dimensionner le système de production.

	<i>Indicateur</i>	<i>Types d'unité possibles</i>	<i>Types d'agrégation possibles</i>
Indicateurs sur les ressources	Charge	En nombre d'opérations ordonnancées, en temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les ressources
	Coût	Monétaire	Somme
	Taux d'occupation	Pourcentage	Somme, moy, min, max, écart type sur les ressources
Indicateur sur les ordres de fabrication	Retard/avance	En nombre d'ordres de fabrication, en temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les OF
	Temps de réalisation	En temps	Somme, moy, min, max, écart type sur les OF
	Ratio de latence	Pourcentage	Somme, moy, min, max, écart type sur les OF

Tableau 5. Indicateurs globaux (indicateurs de production).

Le tableau 5 résume ces indicateurs. Chaque indicateur peut éventuellement être exprimé dans plusieurs unités et peut être agrégé de plusieurs manières. Par exemple, l'indicateur « retard/avance » peut être exprimé sous la forme du temps entre la date de besoin et la date de fin réelle ou sous la forme du nombre d'ordres de fabrication en retard. Ce même indicateur peut être agrégé à partir d'une somme (total, moyenne) ou du retard minimum ou maximum, etc. Ces indicateurs sont à maximiser ou à minimiser, selon le contexte de l'étude. Ils sont naturellement antagonistes (partiellement ou totalement). Par exemple, une production au plus tôt (indicateur temps de réalisation de type Cmax) est peu compatible avec une production juste à temps (indicateur Retard/Avance).

A ces indicateurs portant sur la production, il est possible d'ajouter les indicateurs suivants :

- Indicateur de réactivité : temps requis pour prendre les décisions et pour simuler les modèles,
- Indicateur de distribution : nombre de messages échangés entre UMD-RP, ratio entre le temps passé en processus d'ordonnancement par rapport au processus d'allocation, etc.

Les indicateurs de production vont permettre d'analyser les performances des différents ordonnancements et de décider des paramètres adéquats en fonction des souhaits du décideur. Les deux autres types d'indicateurs (indicateurs de décision et de distribution) nous permettront de valider la distribution totale, à définir le degré de réactivité limite en fonctionnement temps-réel et, éventuellement, de justifier une modification de la structure du système (regroupement de systèmes opérants, regroupement d'UMD-RP, etc.) dans un cadre d'amélioration des performances ou d'adaptation (cf le quatrième processus).

Dans le cadre de cette étude, étant donné l'objectif de production juste à temps, nous utiliserons les indicateurs suivants à minimiser (les ressources ayant pour fonction l'arasage, le traitement thermique et le contrôle visuel sont particulièrement critiques) :

- un indicateur de type « retard », exprimé en unité de temps, agrégé sous la forme de la valeur maximale du retard des ordres de fabrication (indicateur C1);
- un indicateur de type « retard », exprimé en nombre, agrégé sous la forme du nombre (somme) des ordres de fabrication en retard (C2) ;
- un indicateur de type « retard », exprimé en unité de temps, agrégé sous la forme de la moyenne des ordres de fabrication en retard (C3) ;
- un indicateur de fin de réalisation, exprimé en unité de temps, agrégé sous la forme d'un maximum (C4, couramment appelé Cmax ou Makespan);
- trois indicateurs de type « taux d'occupation », exprimés en unité de temps, agrégés sous la forme de l'écart type pour les ressources d'arasage 5, 6 & 7 (C5), de contrôle visuel 9, 10 & 11 (C6) et de traitement thermique 18, 19 & 20 (C7) ;

– trois indicateurs de type « charge », exprimés en unité de temps, agrégés sous la forme d'un écart type pour les ressources d'arasage 5, 6 & 7 (C8); de contrôle visuel 9, 10 & 11 (C9) et de traitement thermique 18, 19 & 20 (C10).

Comme indiqué précédemment, une analyse de Pareto-dominance doit être réalisée (voir 2.3). Ainsi, sur les 288 ordonnancements générés, seuls 14 ordonnancements ne sont pas dominés, soit 5% (c'est à dire que pour chacun de ces 14 ordonnancements, il n'existe pas un autre ordonnancement qui soit meilleur sur l'ensemble des indicateurs). Un exemple d'ordonnancement dominé est celui dont les UMD-RP cherchent à maximiser la règle 11, ce qui conduit à ordonnancer systématiquement les opérations sur la même ressource. Le tableau 6 présente ces 14 ordonnancements ainsi que leurs évaluations pour l'ensemble des indicateurs choisis.

Suite à l'élaboration de cette matrice d'évaluation, le décideur est appelé à entrer les comparaisons relatives entre les paires de critères (indicateurs). Le degré d'appartenance de chaque critère à chaque sous-ensemble flou des critères sera ainsi calculé. Etant donné les objectifs de production juste à temps, nous supposons que l'ordre de préférence adopté par l'expert est le suivant : {C1, C2, C3} >> {C8, C9, C10} >> {C5, C6, C7} >> {C4}, >> signifiant « plus important que ». Les comparaisons relatives et les degrés d'appartenance sont donnés dans le tableau 7.

L'algorithme de sélection multicritère établit une comparaison floue entre les 14 solutions admissibles. Ces comparaisons sont données dans le tableau 8. M signifie « plus important que », E « équivalent à » et m « moins bon que ».

catégorie d'indicateur:	Production/Ordres de fabrication				Production/Ressources de production						
	Retard/Avance			Réalisation	Taux d'occupation			Charge			
nom indicateur:	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
numéro indicateur:	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
règle d'agrégation:	Maximum temporelle	Maximum nombre	Moyenne temporelle	Maximum temporelle	Ecart type temporelle			Ecart type temporelle			
unité:	min	min	min	min	min			min			
monotonie:	min	min	min	min	min			min			
type d'objet de l'indicateur:	Ofs	Ofs	Ofs	Ofs	DMU-RP	DMU-RP	DMU-RP	DMU-RP	DMU-RP	DMU-RP	
sous-ensemble des objets:	en retard	en retard	en retard	tous	5,6&7	9,10&11	18,19&20	5,6&7	9,10&11	18,19&20	
Simul.	Règles de décision décision1/décision2/décision3:										
S1	5(min)/9(max)/9(max)	1272	25	503,5	1953	0,0144	0,152	0,054	3,79	6,1	34,1
S2	5(min)/10(max)/12(min)	1392	26	726,8	1852	0,01012	0,142	0,035	1,43	4,72	24,2
S3	1(min)/9(max)/9(min)	1450	26	507	2130	0,01077	0,155	0,115	4,07	2,46	168,85
S4	5(min)/11(max)/9(min)	1279	24	538,2	1819	0,0215	0,169	0,079	2,34	5,76	22,36
S5	5(min)/9(min)/9(min)	1182	22	435	1794	0,0124	0,152	0,034	0,94	5,32	11,87
S6	6(min)/9(max)/9(min)	1651	26	770	2595	0,125	0,044	0,177	53,6	19,07	178,29
S7	5(min)/9(min)/9(max)	1138	22	414,2	1849	0,0315	0,11	0,042	8,88	2,05	42,76
S8	6(min)/9(min)/9(max)	2478	25	924,3	3578	0,026	0,037	0,358	12,18	41,89	537,44
S9	5(min)/9(max)/9(min)	1285	25	499,9	1965	0,0238	0,149	0,032	3,52	5,33	16,8
S10	5(min)/13(min)/13(min)	618	28	442,6	1807	0,004	0,188	0,055	0,95	5,22	49,08
S11	5(min)/10(max)/13(min)	1565	29	880	2043	0,014	0,1203	0,0118	4,19	4,41	10,75
S12	5(min)/10(min)/13(min)	846	26	367,2	1937	0,0227	0,166	0,053	4,34	4,67	35,65
S13	5(min)/9(max)/13(min)	1074	29	589,2	1889	0,007	0,162	0,012	1,49	4,97	13,3
S14	6(min)/13(min)/13(min)	1045	30	653	2185	0,072	0,075	0,077	13,91	76,64	31,12

Tableau 6. Matrice multicritère (ordonnancements candidats S_i et indicateurs C_j).

L'algorithme de sélection proposera alors la solution S7. La solution S5 est également une solution intéressante. Dans ce cas d'étude, le décideur constate ainsi

que la combinaison des règles 5(min)/9(min)/9(max) et éventuellement de 5(min)/9(min)/9(min) réalise le meilleur compromis entre les critères du problème dans un objectif de production juste à temps.

Comparaison relative											Degré d'importance		
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	critère important	critère d'importance moyenne	critère non important
C1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
C2	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
C3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
C4	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1
C5	-1	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0,66	0,33
C6	-1	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0,66	0,33
C7	-1	-1	-1	1	0	0	0	-1	-1	-1	0	0,66	0,33
C8	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0,33	0,66	0
C9	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0,33	0,66	0
C10	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0,33	0,66	0

Tableau 7. Comparaison relative et degrés d'appartenance.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
S1	E	M	M	m	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S2		E	m	m	m	M	m	M	m	m	M	m	m	M
S3			E	m	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S4				E	m	M	m	M	m	m	M	m	M	M
S5					E	M	m	M	M	M	M	M	M	M
S6						E	m	M	m	m	m	m	m	m
S7							E	M	M	M	M	M	M	M
S8								E	m	m	m	m	m	m
S9									E	m	M	m	M	M
S10										E	M	m	M	M
S11											E	m	m	m
S12												E	M	M
S13													E	M
S14														E

Tableau 8. Comparaison floue des 14 ordonnancements candidats.

3.5 Quatrième processus

Ce quatrième processus n'est pas à l'heure actuelle automatisé, il n'est donc pas détaillé dans cet article. Cependant, une comparaison sur un cas d'étude fortement réduit par rapport à celui présenté ici, dont les résultats sont exprimés en terme de temps de réalisation (Cmax), a été réalisée avec une méthode d'ordonnement centralisée et statique à base de programmation par contraintes. Cette comparaison met en exergue une sous-performance de l'approche décentralisée qui est de l'ordre de 10% à 15% [TRE 01]. Ce différentiel de performance est dû aux faits que :

- la méthode d'ordonnement par contrainte est capable de retour en arrière (backtracking) sur les placements alors que l'approche proposée, afin de conserver cette capacité de fonctionnement en temps réel ne présente pas cette particularité.
- le modèle du système de production utilisé par la méthode d'ordonnement par contrainte est fortement simplifié (temps de transfert nuls, etc.)

– la gestion des données est dynamique dans le cadre de la méthode décentralisée et statique dans le cas de la méthode par contrainte (cette dernière dispose ainsi de toutes les informations au début du calcul).

4 Conclusion

Cet article a présenté une méthode conception de systèmes décentralisés d'ordonnement réactif, appelée D-Sign. Cette méthode regroupe différents paradigmes de modélisation, souvent considérés de façon isolée dans le domaine de l'ordonnement. Les principaux avantages de cette méthode sont les suivants :

– le découplage hiérarchique entre système opérant et UMD responsables de l'ordonnement permet de modéliser au degré de finesse souhaité les systèmes de production et de prendre en compte un maximum de contraintes de production rarement considérées par ailleurs,

– elle permet de générer par simulation un large panel de solutions réalistes (admissibles) et proposent des outils d'évaluation de la qualité des résultats obtenus afin d'établir les jeux de paramètres adaptés aux objectifs de production recherchés,

– les systèmes d'ordonnement réactifs conçus peuvent être, hors-ligne, paramétrés et simulés de manière décentralisée voire centralisée, et en-ligne, décentralisés au niveau des entités physiques ou informationnelles, sous réserve de contraintes de temps de réponse (cf. l'indicateur de réactivité). Ils peuvent également être utilisés pour valider la conception d'un système de pilotage réactif car les gestions des informations est volontairement dynamique et supporte les fonctionnements non nominaux (ordres urgents, pannes, indisponibilités, etc.).

Concernant le concept UMD, une perspective à court terme porte sur l'intégration de mécanismes récursifs notamment au niveau du protocole d'allocation, sous contrainte de temps de réponse. Dans ce cas, l'allocation d'une opération i serait validée récursivement en fonction des résultats de la simulation de l'allocation de l'opération $i+1$ du même ordre de fabrication (selon un algorithme de type min-max par exemple). Plus généralement, cette allocation pourrait également être évaluée au regard de la simulation des n allocations des n opérations suivantes. Cette approche permettrait alors d'améliorer les performances des résultats en corrigeant un peu mieux la « myopie » caractéristique des systèmes décentralisés.

Concernant la méthode D-Sign en elle-même, une perspective à plus long terme porte sur l'intégration de mécanismes auto-adaptatifs au niveau de la détermination des paramètres de conception (type de décentralisation, type de coopération, etc.) et d'exploitation (règles de décision, etc.) basés par exemple sur les plans d'expérience ou les raisonnements à base de cas. Cette perspective, avec celle qui porte sur l'approfondissement des aspects méthodologiques, constituent à notre avis deux des enjeux majeurs au niveau de la recherche à venir dans ce domaine. Il faut noter enfin que le découplage système opérant /UMD doit permettre en perspective d'appliquer la méthode D-Sign à d'autres contextes intrinsèquement réactifs (maintenance,

contrôle qualité, reconnaissance visuelle) ou naturellement décentralisés (entreprise étendue ou en réseau, chaînes logistiques, distribution).

5 Bibliographie

- [ALB 95] ALBAYRAK S. et KRALLMANN H, *Distributed artificial intelligence in manufacturing control*, in *Artificial Intelligence in Industrial Decision Making, Control & Automation*, S.G. Tzafestas & H.B. Verbruggen (eds.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 247-294.
- [BUR 91] BURKE P. et PROSSER P., « a distributed asynchronous system for predictive and reactive scheduling », *Artificial Intelligence in Engineering*, 1991, vol. 6, n°3, p. 106-124.
- [CHE 97] CHEBEANE H. et ECHALIER F., « An approach based on multiagents for the reactive control of manufacturing workshop », *IEPM conférence*, Lyon, 1997, pp 206-215.
- [COO 75] COOK R.L. et STEWART T.R., « A Comparaison of seven methods for obtaining Subjective Descriptions of Judgmental Policy », *Organ. Behav. Hum. Perf.*, 1975, 13, p.31-45.
- [DUF 94] DUFFIE N. A. et PRABHU V. V., « Real-time distributed scheduling of heterarchical manufacturing systems », *J. of Manufacturing Systems*, vol. 13, n° 2, 1994, p. 94-107.
- [ESQ 99] ESQUIROL P. et LOPEZ P., *L'ordonnancement*, Col. Gestion, éd. Economica, 1999.
- [FAR 93] FARGIER H., LANG J. et SCHIEX T., « Selecting preferred solutions in fuzzy constraint satisfaction problems » In *First European Congress on fuzzy and Intelligent Technologies, EUFIT'93*, Aix La Chapelle, Allemagne, Sept. 1993, p. 1128-1134,.
- [FER 93] FERRARINI A., COUVREUR L. et BRUN-PICARD D., « A new decentralized approach for FMS control » proc. Of the *7th IEEE annual Computer European Conference on Computers in Design, Manufacturing and Production*, Paris, Mai 1993, p. 410-416.
- [GOU 99] GOUARDERES E., « un modèle fonctionnel multi-agents pour le pilotage des systèmes de production », *Mosim'99*, 6-8 octobre 1999, Annecy, p. 345-350.
- [GZA 00] GZARA M., HAMMADI S. et BORNE P., « Fuzzy multi-criteria optimisation of job shop scheduling », *WAC 2000*, preprints, Hawaï.
- [IBR 92] IBRAHIM A. et BILAL M. AYYUB, « Multi-criteria ranking of components according to their priority for inspection ». *Fuzzy Sets and Systems*, 48(1), 1992, p. 1-14.
- [KOU 99] KOUISS K. et PIERREVAL H., « pilotage réactif d'une cellule flexible de l'Ifma », *Modélisation des systèmes réactifs – MSR'99*, (J.J. Lesage coord.), 1999, p. 417-426.
- [MEB 96] MEBARKI N., PIERREVAL H. et KOUISS K., « une approche multi-agents pour l'ordonnancement dynamique d'un système de production flexible », *ingénierie des systèmes d'information*, vol. 4, n° 5, 1996, p. 621-636.
- [MOU 92] MOUSSEAU V., « Analyse et classification de la littérature traitant de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision », *Operations Research*, Vol. 26, n°4, 1992, p. 367-389.

- [NAS 98] NASO D. et TURCHIANO B., « A Fuzzy Multi-Criteria Algorithm for Dynamic Routing in FMS », *IEEE* 98, p. 457-462.
- [NUT 80] NUTT P. CC., « Comparing Methods for Weighting Decision Criteria », *Omega*, 1980, 8, p.163-172.
- [PAR 91] PARUNAK V. H. D., « Characterizing the manufacturing scheduling problem », *Journal of manufacturing systems*, 10, n° 3, p. 241-252.
- [PAT 98] PATRITI V., « Systèmes de pilotage auto-organisés et gammes distribuées : méthode de conception et application à une machine-outil », Thèse de doctorat, Nancy, 1998.
- [PES 98] PESIN P., TRENTESAUX D. et TAHON C., « Proposal of an event filtering approach to improve the reactive management of complex industrial systems » *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 32, n°4, 1998, p. 487-508.
- [PUJ 99] PUJO P., BROISSIN N., MEYER S. et BERTRAND J. C., « pilotage décentralisé des systèmes de production », *congrès GI*, Montréal, 1999, p. 1975-19819.
- [ROU 95] ROUBELLAT F., BILLAUT J.C. et VILLAUMIE M., « ordonnancement d'atelier temps réel: d'orabaid à ordo », *RAPA*, vol 8, n°5, p. 683-713.
- [ROY 98] ROY D., « Une architecture hiérarchisée multi-agents pour le pilotage réactif d'ateliers de production », Thèse de doctorat, Metz, 1998.
- [SAA 80] SAATY T.L., *The analytic hierarchy process*, MacGraw-Hill, 1980.
- [SEN 98] PRATYUSH S. et JIAN-BO Y., *Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design*, Springer-Verlag London Ltd. 1998.
- [SLA 94] SLANY W., « Fuzzy scheduling », eingereicht an der Technischen Universität Wien Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Juin 1994.
- [SMI 80] SMITH R.G., « The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver », *IEEE Trans. on Comp.*, vol. C29, n°12, 1980, p. 1104-1113.
- [TCH 94] TCHAKO J.F.N., BELDJILALI B., TRENTESAUX D. et TAHON C., « Modelling with coloured Petri nets and simulation of a dynamic and distributed management system for a manufacturing cell », *int. J. of CIM*, vol. 7, n° 6, 1994, p. 323-339.
- [TRE 01] TRENTESAUX D., PESIN P. et TAHON C., « Comparison of Constraint Logic Programming and Distributed Problem Solving: a case study for interactive, efficient and practicable job-shop scheduling », *Computer & Industrial Engineering*, vol. 39, 2001, p. 187-211.
- [YAG 81] YAGER R., « A new methodology for ordinal multiobjective decision based on fuzzy sets ». *Decision Sciences*, vol. 12, 1981, p. 589-600.
- [YAG 82] YAGER R., « Measuring Tranquillity and Anxiety in Decision-Making : an Application of Fuzzy Sets », *Int. J. General Systems*, vol. 8, p. 136-149.
- [YAR 98] YARON K. et GIDEON L., « Multi-Criteria Scheduling Optimization Using Fuzzy Logic », *IEEE* 1998, p. 445-450.