

Chapitre 4

Pilotage par tentative d'ajustement du plan prévisionnel

4.1. Introduction

L'apparition d'événements contingents génère des perturbations dans le déroulement initialement prévu des tâches de production. Si ces perturbations ne sont pas trop importantes, il n'est pas nécessaire de remettre en cause la totalité du planning prévisionnel, mais plutôt de chercher des solutions locales qui permettent de l'ajuster. Cet ajustement peut notamment consister à réaffecter certaines tâches à d'autres ressources de l'atelier. Cependant, il n'est pas toujours possible d'élaborer une telle solution, nous sommes alors dans ce cas conduits à remettre en cause la totalité de l'ordonnancement.

Il ne s'agit pas dans un ajustement de calculer une solution optimale, mais de trouver une solution satisfaisante respectant au mieux l'ordonnancement prévisionnel : en d'autres termes de limiter le réordonnancement de l'atelier lors d'apparition d'aléas de production.

En matière de pilotage des systèmes de production, les performances réellement atteintes au sein d'un atelier sont souvent éloignées de celles initialement prévues en gestion de production. Une raison importante de cet écart réside dans le caractère excessivement rigide des contraintes issues du plan de production. En effet, ce dernier imposant généralement de respecter à la lettre un scénario de fabrication unique, il permet difficilement de s'adapter aux aléas inhérents à la fabrication temps réel (pannes, retard, etc...). Ainsi, la fonction pilotage, en assurant la coordination et le contrôle des tâches, en régulant le fonctionnement des moyens de production, et surtout en réagissant face aux perturbations et aléas de la production, joue un rôle déterminant dans les systèmes de production. Les recherches, de plus en plus nombreuses dans ce domaine, ont été menées sous deux aspects complémentaires :

- *L'aspect fonctionnel* qui se préoccupe des fonctionnalités et des structures à mettre en œuvre pour réaliser le pilotage dans l'atelier, c'est-à-dire pour assurer la collecte des informations à partir des organes physiques de l'atelier, éventuellement leur pré-traitement, la transmission de ces informations au(x) centre(s) de décision(s).

- *L'aspect décisionnel* qui s'intéresse à l'élaboration de solutions pour résoudre des conflits, pallier les aléas ; plus généralement, cet aspect décisionnel tente de proposer des solutions en fonction d'objectifs prédéfinis et de l'environnement courant de l'atelier (perçu au travers de l'aspect fonctionnel) chaque fois qu'une décision doit être prise.

Dans ce chapitre, une définition générale de la perturbation étant donnée, sont présentés les différents types de perturbations auxquels doit faire face un atelier. Puis, un état de l'art portant sur les méthodes existantes d'amélioration de la réaction aux perturbations sera développé. Ensuite, les perturbations considérées dans ce chapitre seront spécifiées ainsi que deux méthodes différentes y faisant face :

- La première consiste à rechercher une solution de substitution à l'aide d'une analyse multicritère des ressources disponibles dans une organisation centralisée de l'atelier.

- La seconde consiste à construire une solution de réparation émergeant par coopération entre les ressources dans une organisation distribuée de l'atelier.

Pour conclure, nous dresserons le bilan du chapitre et nous donnerons quelques perspectives de recherche.

4.2. Définition et traitement de perturbations dans un ordonnancement d'atelier

Nous retiendrons la définition d'une perturbation proposée par P. Baillet [BAI 94] : "Toute information qui contredit une prévision faite aussi bien sur le fonctionnement du système opérant que sur l'évolution des objectifs élaborés à partir de la prévision de l'évolution de l'environnement."

Les perturbations peuvent être d'origine humaine (augmentation de l'absentéisme, grèves, motivation, capacité de travail, etc.), dues aux équipements (problème logiciel, panne des machines informatiques, défaillance des machines de production, variation de la productivité due à l'utilisation d'un procédé à rendement aléatoire, problème de transport, etc.), à la matière (manque, mauvaise qualité, etc.) et aux informations (retard et/ou défaut de qualité des ordres reçus, etc.) [PUJ 95], [BRO 99].

4.2.1. Différents types de perturbation

Dans un premier temps, nous distinguerons deux grands types de perturbations selon leur origine interne ou leur origine externe à l'atelier :

- *Les perturbations externes* : Toute défaillance d'une opération résultant d'une intervention externe (arrivée d'une commande urgente, annulation d'une commande, modification de l'urgence d'une opération, rupture de stock localisé...).

- *Les perturbations internes* : Toute défaillance d'une opération due à un dysfonctionnement interne. Les perturbations internes rassemblent tous les problèmes liés aux moyens de production (dysfonctionnement d'une opération, bris d'outils, panne ou accaparement d'une ressource...) et aux moyens "humains".

Notre intérêt porte sur les perturbations internes au système de production qui constituent une menace pour l'atteinte des objectifs. Parmi ces perturbations, les perturbations associées à une opération telles que Rebut, Non-conformité, blocage, définies ci-dessus ne seront pas considérées. Une pièce qui est rebutée est supposée être une perte, elle n'est pas reconsidérée dans la réaffectation. Seront pris en compte ici les perturbations associées à une ressource de type panne-machine (panne technique de la machine¹). En effet, l'indisponibilité temporaire de certaines ressources provoque un manque à gagner, des coûts de stockage, et un retard de certaines opérations, ce qui, par voie de conséquence, dégrade les performances du système.

¹ La famine de la machine due au blocage des opérations (rupture d'approvisionnement,...) n'est pas considérée comme étant une panne.

Concernant les perturbations internes, B. Grabot et L. Geneste [GRA 94], [ORG 95] ont identifiés lors d'une étude conduite dans plusieurs ateliers, quatre types principaux de perturbations affectant le fonctionnement d'ateliers de fabrication de pièces élémentaires et d'assemblage simple :

- Les perturbations de type "*Rebut*" correspondent à la fabrication de pièces qui ne répondent pas aux spécifications et qui ne peuvent être retouchées pour les rendre conformes. Ces pièces sont par conséquent éliminées et doivent être relancées en urgence en fabrication ce qui perturbe le fonctionnement prévu de l'atelier.

- Les perturbations de type "*Non-conformité*" correspondent à des pièces qui ne sont pas exactement conformes à la spécification mais qui présentent des anomalies que l'on peut envisager de corriger.

- Une perturbation peut aussi être de type "*Blocage opération*". Ce type de perturbation survient essentiellement à la suite d'une rupture d'approvisionnement ou d'un bris d'outil. En fonction de la durée du blocage et de l'état de l'atelier, la ressource occupée par l'opération est ou non libérée. Les commandes intempestives viennent aussi perturber le fonctionnement d'un atelier.

- Les perturbations de type "*Défaillance machine*" se produisent lorsqu'une machine est bloquée en attendant une réparation. Suite à une panne de ressource, l'opération en cours d'exécution est suspendue. En fonction de l'urgence de l'opération et de la durée de la panne, l'opération est soit en attente de fin de panne, soit réaffectée sur une autre ressource.

4.2.2. Du traitement des perturbations : les méthodes existantes

Les méthodes que l'on rencontre couramment tentent, lors du traitement d'une perturbation de rester aussi près que possible du plan décidé et appliqué jusque là. Différentes approches sont proposées, nous en citons quelques-unes en précisant les différentes méthodes auxquelles elles ont conduit.

Approche par séquence de groupes des tâches permutables : Il s'agit de rechercher un ensemble d'ordonnements admissibles prédictifs. L'ensemble des ordonnements ainsi caractérisé se matérialise au niveau de chaque ressource par une suite de groupes d'opérations permutables à exécuter. Ce groupe d'opérations privilégie des réactions locales pour une certaine catégorie de perturbations sans avoir à remettre en cause globalement le plan. Dans [THO 80], les solutions sont obtenues en s'appuyant sur la notion de groupes de tâches permutables et le concept de marge libre séquentielle. Cette approche a donné lieu à de nombreux travaux, citons [LEG 89], [BIL 96]. Un logiciel prototype, ORABAID (ORdonnement d'Atelier Basé sur une AIdé à la Décision), a été mis au point dans les années 80 et a servi de base à l'élaboration du logiciel d'ordonnement temps réel ORDO [ROU 94], [ART 99]. La méthode consistant à rechercher un ensemble

d'ordonnements admissibles dès la réception des ordres de fabrication nécessite des calculs importants en prévision des perturbations. Il s'agit, lors de la réalisation du plan d'ordonnement prévisionnel, d'allouer à chaque opération une certaine liberté sous la forme d'une marge d'exécution.

Approche par propagation de contraintes et programmation par contraintes :

L'être humain arrive assez bien à sélectionner, ordonner et finalement à retenir une décision dans un ensemble d'alternatives ; en revanche il est très difficile pour lui de vérifier et de maintenir un ensemble important de contraintes et de tâches. Au contraire le système informatisé est là plus performant. Pour répondre aux difficultés de modélisation et de vérification de cohérence des contraintes d'un problème d'ordonnement, certains auteurs proposent une approche basée sur l'Analyse Sous Contraintes (ASC) et sa mise en œuvre en programmation logique sous contraintes [LOP 95], [HAU 96]. Une gestion active des contraintes consiste, à partir de ces dernières et des valeurs des variables déjà instanciées, de limiter l'espace de recherche. Une fois les mécanismes de propagation déterminés, il est nécessaire de les mettre en œuvre, ce qui est qualifié par le terme de "programmation par contraintes". Dans C. Le Page [LEP 92], les perturbations sont prises en compte comme des contraintes supplémentaires. La convergence vers une solution est rapide, néanmoins un plan d'ordonnement voisin du plan prévisionnel n'est pas toujours obtenu, ce qui oblige parfois l'atelier à se réorganiser complètement même pour une perturbation faible.

Approche utilisant les chaînes de Markov : Dans [DHO 93] est proposée une approche par chaînes de Markov pour la modélisation et l'évaluation de la performance d'un système manufacturier cellulaire. Ce système fonctionne selon une stratégie qui, en cas de défaillance d'une des machines affectées à une cellule, permet d'acheminer le flux de matière vers une machine similaire appartenant à une autre cellule. Cette stratégie considère que si une machine de la cellule principale tombe en panne, alors le flux de matière est aiguillé vers la machine de réserve avec une probabilité (d) si et seulement si cette dernière est disponible. Autrement, la production de la cellule est interrompue avec une probabilité ($1-d$). Cette stratégie permet, dans la mesure du possible, d'éviter l'arrêt complet de la cellule dans laquelle la panne s'est produite et de maximiser le taux d'utilisation des machines des autres cellules. Cependant, l'approche proposée s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses telles que : si la machine de réserve n'est pas disponible, alors la production de la cellule est interrompue jusqu'à ce que la machine hors d'usage soit réparée. Dans l'éventualité où la machine de réserve tombe en panne durant le processus de réparation, la production de la cellule principale est de nouveau interrompue jusqu'à la remise en état de la machine tombée en panne la première. Ceci nécessite un réparateur par cellule. Les auteurs considèrent également que dans le cas où plus d'une machine de la cellule principale tombe en panne, dans une même période, la production dans cette cellule est interrompue.

Approche par réparation d'ordonnancement (repair scheduling) : la réparation d'ordonnancement consiste en des ajustements successifs d'un ordonnancement initial. A partir d'opérations de modification locale et limitée des plans de charges des ressources impliquées, les violations de contraintes entre les tâches de fabrication sont progressivement corrigées [ZWE 93]. L'approche par réparation d'ordonnancement se caractérise de fait par sa capacité à travailler sur des ordonnancements incomplets (des tâches ne sont pas affectées) ou partiellement défectueux (violation de contraintes). Utilisée en partie dans des approches telles que OPIS [SMI 94] ou SONIA [COL 91], cette méthode a été généralisée par [ZWE 93] ou encore [MIY 94]. Notons que la notion de *traitement par écart* citée dans [BAI 94] relève également d'une approche par réparation d'ordonnancement.

Ces quatre approches du traitement des perturbations ont conduit à proposer différentes méthodes qui ont servi de base au développement d'outils informatiques. Cependant chacune de ces méthodes fait un certain nombre d'hypothèses sur le système de production d'une part, sur la nature et le type de perturbation d'autre part, et n'est applicable que dans certaines structures.

4.2.3. Problématique et approches considérées

Les Systèmes Flexibles de Production (SFP) sont des ensembles complexes dont la gestion devient de plus en plus difficile. En effet, assurer le déroulement de la fabrication dans ce type de systèmes est une tâche difficile compte tenu du nombre et de la variété des éléments qui interviennent (machines, éléments de transport, opérateurs, etc...), des exigences des clients et des perturbations qui surviennent au cours de leur fonctionnement. Aujourd'hui, le caractère de plus en plus perturbé de l'environnement conduit à considérer l'intégration de la gestion des perturbations comme une des nouvelles exigences du pilotage réactif des systèmes de production.

D'une façon générale, les approches introduites précédemment nous apparaissent présenter deux faiblesses principales. La première réside dans le fait qu'elles organisent le traitement de la perturbation sur un choix des machines monocritère alors que bien souvent, dans la réalité, ce choix est multicritère, les acteurs humains impliqués dans le traitement des perturbations le savent bien. Les auteurs considèrent des méthodes de résolution à un seul critère (minimisation du temps total d'exécution, maximisation de la productivité,...). Assez souvent, quand un problème d'optimisation multicritère se pose, on essaie de le ramener à un problème d'optimisation à un seul critère. Cette méthode est difficile à appliquer dans le cas où les différents critères sont exprimés sous des formes différentes. Il est difficile, voire impossible, de les ramener à un seul critère. Il est plus intéressant de trouver une solution au problème en prenant en compte les différents critères.

La seconde faiblesse concerne le traitement de la perturbation qui, dans ces méthodes, reste centralisé alors que des solutions d'ajustement peuvent se construire par coopération au plus bas niveau entre les machines de l'atelier, niveau auquel bien souvent apparaît la perturbation. Il s'agit ainsi de passer d'une résolution centralisée à une résolution distribuée et coopérative du problème de réordonnancement.

C'est pourquoi il apparaît judicieux d'introduire deux nouvelles approches non nécessairement exclusives de celles déjà évoquées. La première approche, s'adressant à des systèmes de pilotage centralisés, est qualifiée de multicritère du fait qu'elle prend en compte divers critères dans la réaffectation des opérations bloquées pour le traitement de la perturbation. Cette réaffectation est assurée par un algorithme multicritère basée sur les fondements de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) (cf. figure 4.1.a). La seconde approche proposée s'inspire de l'approche par réparation précédemment introduite, en prenant en compte le caractère distribué du système de pilotage (cf. figure 4.1.b). Ce caractère permet un traitement de la perturbation reposant sur la capacité des machines de production à résoudre par coopération à différents niveaux les conflits résultant de la perturbation. Une méthode développée selon une architecture multi-agent est présentée.

Dans ces deux nouvelles approches, comme l'illustre la figure 4.1, l'atelier de production est une cible potentielle d'événements pouvant perturber son activité. Dans les travaux présentés dans ce chapitre les décisions sont prises au niveau opérationnel. Dans ce contexte les deux méthodes s'attachent à minimiser l'impact d'une perturbation sur l'ensemble de l'atelier de production.

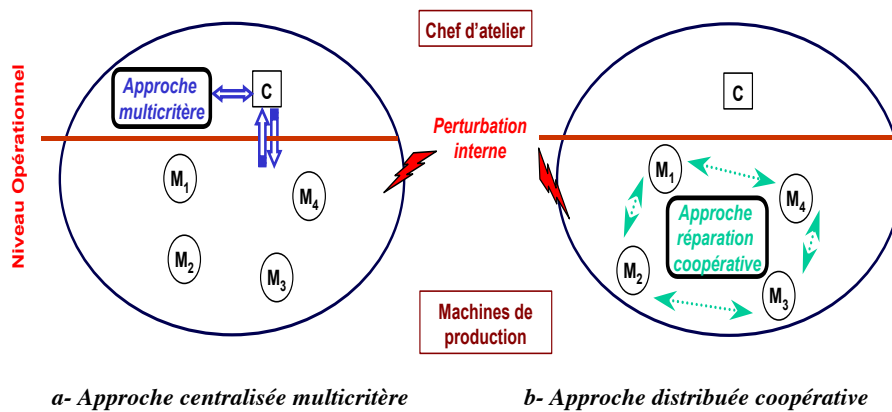


Figure 4.1. Modélisation d'un atelier de production

4.3. Une approche multicritère : la méthode Analytic Hierarchy Process

Face à l'impossibilité de réaliser une tâche sur une machine initialement prévue, il s'agit de rechercher quelle est la "meilleure" machine pouvant la remplacer. Cette recherche est basée sur une méthode d'aide multicritère à la décision qui intègre différents indicateurs propres à chaque machine selon trois familles de critères : le temps, le coût et la fiabilité.

Adopter en pilotage une modélisation multicritère c'est accepter que plusieurs critères plus ou moins conflictuels soient pertinents et légitimes pour piloter le système. Le développement d'une méthode multicritère accroît la capacité théorique à proposer une prise de décision efficace, la notion d'optimum absolu perd alors son sens.

Nous décrivons dans ce qui suit la méthode d'aide à la décision sur laquelle nous nous sommes basés pour établir l'algorithme multicritère de réaffectation. Puis, nous présenterons la notion introduite de "Potentiel". Enfin, pour une meilleure compréhension, nous présenterons l'algorithme proposé en l'illustrant par un exemple.

4.3.1. Intérêt de l'approche multicritère

Plusieurs approches ont été développées en environnement industriel : dans [TAB 88], l'auteur détaille l'intégration de l'approche multicritère au sein de plusieurs fonctions industrielles, [BEL 92] et [DEC 82] traitent du problème de l'ordonnancement multicritère, [POM 93] fournit un panel riche d'exemples appliqués à l'industrie.

Un algorithme multicritère vise à établir une sélection simple ou multiple parmi un ensemble de choix en utilisant un ensemble de critères pour évaluer des préférences relatives. La prise de décision utilisant des algorithmes multicritère a été largement développée et publiée dans [KOR 92], [POM 93], [ROY 93], [ROY 85], [ZEL 82]. Ces travaux se basent sur les concepts introduits par B. Roy et D. Bouyssou. Diverses applications industrielles des algorithmes multicritère peuvent être trouvées dans la littérature : [GRA 92], [TAB 88].

Les avantages qu'offre l'aide multicritère à la décision sont de deux types [TRE 98] :

- du point de *vue théorique* : le paradigme multicritère vise à aider le décideur en utilisant des algorithmes simples basés sur des hypothèses complexes. La théorie analytique propose des algorithmes complexes basés sur des hypothèses simples [ROY 93],

- du point de *vue applicatif* : la plupart des applications industrielles concernent la mise en place des algorithmes de prise de décision issus de la programmation des buts (goal programming) pour les niveaux stratégique (emplacement des installations, gestion, choix, vente, etc...) et tactique (planification de la production, etc.). Il n'y a presque aucune application des algorithmes multicritère au niveau opérationnel. En effet, excepté les travaux de [TAB 94] et [TRE 96] en environnement de pilotage temps-réel, nous ne connaissons pas de tentative d'application des méthodes multicritère au niveau opérationnel.

4.3.2. La méthode AHP "Analytic Hierarchy Process"

AHP a été appliquée pour la première fois par Thomas L. Saaty en 1971 [SAA 96] alors qu'il travaillait sur des problèmes de planification d'urgence pour le ministère de la défense aux Etats-Unis. La maturité de cette méthode a été confirmée à travers plusieurs études.

Cette méthode propose d'évaluer tous les paramètres d'un problème multicritère par le biais d'une série de comparaisons binaires. Il est donc plus facile pour un décideur d'effectuer des comparaisons binaires que de prendre en compte l'ensemble des paramètres du problème. Elle constitue un outil puissant et flexible de prise de décision pour des problèmes multicritère complexes dans lesquels des aspects qualitatifs et quantitatifs doivent être incorporés [HAR 89].

D'une manière générale la méthode AHP aide tout d'abord les décideurs à structurer les composantes importantes d'un problème en une structure hiérarchique semblable à une arborescence. Elle permet ensuite de synthétiser les résultats en ramenant des décisions complexes à une série de simples comparaisons et de rangements.

De façon plus précise, la mise en œuvre de AHP suit les quatre phases suivantes [SAS 98], [HAR 89] :

- Construction d'une structure hiérarchique de décision spécifique au problème traité.
- Comparaison par paire des éléments de chaque niveau de la hiérarchie construite : l'échelle de valeur de 1-9 (cf. tableau 4.1) est utilisée.
- Estimation du poids relatif entre éléments de chaque paire de deux niveaux adjacents, ce qui développe des priorités pour les alternatives.
- Agrégation des poids relatifs des différents niveaux de la hiérarchie afin de pouvoir fournir un classement des alternatives de décision.

Valeurs numériques	Définition
1	également important (aucune préférence)
3	légèrement plus important
5	fortement plus important
7	très fortement plus important
9	absolument plus important (préférence absolue)
2,4,6,8	valeurs intermédiaires pour mettre en évidence des compromis
Valeurs Inverses	utilisées pour montrer la dominance du second élément par rapport au premier.

Tableau 4.1. Echelle de mesure de la prépondérance entre deux éléments dans la méthode AHP

En résumé, la comparaison par paire permet d'obtenir l'importance relative d'un élément par rapport à un autre (d'un même niveau). Le vecteur de priorité ou poids (vecteur d'importance relative) exprime quant à lui, le rangement relatif des éléments d'un niveau par rapport à chacun des éléments du niveau adjacent supérieur.

Un grand avantage de la méthode réside dans l'indice (C.R.) dit "coefficient de cohérence" qui permet d'évaluer les calculs effectués. En d'autres termes, il permet de vérifier si les valeurs de l'échelle (1-9) attribuées par le décideur sont cohérentes² ou non. Ce coefficient est obtenu par la formule suivante [HAR 89] :

$$C.R. = C.I. / R.I. \text{ où :} \quad [4.1]$$

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n-1) \text{ est appelé indicateur de cohérence} \quad [4.2]$$

n étant le nombre d'éléments à comparer. λ_{\max} est calculé par :

$$\lambda_{\max} = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \right) / w_i \quad \forall i \quad [4.3]$$

A étant la matrice (n*n) des préférences et w le vecteur de priorité (vecteur d'importance relative). Les valeurs des différents R.I. "Random Index", sont illustrées dans un tableau proposé par Saaty [SAA 80].

² Dans le sens où elles expriment bien ce qu'elles devraient exprimer.

Si $C.R. > 0,1$, il est recommandé que le décideur révise ses jugements. Le chiffre 0,1 est la limite supérieure qui indique qu'il y a une chance de 10% que le décideur ait répondu aux questions d'une façon purement aléatoire. Ainsi, AHP fournit une mesure d'incohérence et permet de réduire cette incohérence.

La méthode proposée dans ce chapitre se situe dans le cadre d'une démarche descriptive inspirée de la méthode d'évaluation des paramètres d'importance : la méthode Analytic Hierarchy Process AHP [OUN 98], [OUN 99a], initialement proposée par Thomas L. Saaty [SAA 80].

Dans le cadre de l'algorithme multicritère proposé, basé sur la méthode AHP, on note que l'échelle 1-9 est utilisée pour la comparaison de données qualitatives et que, les données réelles sont exploitées pour les données quantitatives. Précisons que la prise de décision proposée dans ce chapitre reposera sur plusieurs critères de choix (temps (T), coût (C), fiabilité (R^3)).

4.3.3. Critères de choix

Personne ne décide "tous azimuts". Le décideur oriente son choix selon des axes bien définis. Son principal besoin en matière d'assistance au pilotage porte sur l'évaluation du système en fonction des axes de développement choisis. Nous ne gérons que ce que nous mesurons. Il faut donc construire un système de mesure basé sur la capacité de chaque élément du système physique à répondre aux sollicitations. Nous appellerons cette capacité "Potentiel".

La notion de "Potentiel" est associée à chaque machine-ressource et a été introduite comme base à la prise de décision [OUN 99b]. Le "Potentiel" évalué au regard de différents critères qui permettent de prendre une "bonne" décision : le temps induit par le changement de la ressource en panne (T), le coût lié à l'opération suite à la panne (C) et la fiabilité de la machine alternative (R). Chacun de ces critères comporte un ensemble d'indicateurs.

4.3.3.1. Le critère temps(T) et ses indicateurs

Quatre indicateurs composent le critère temps, décrits ci-dessous : le temps opératoire d'une opération sur une machine, le temps de préparation d'une ressource pour une opération, le temps de transfert et le prochain instant de disponibilité d'une machine.

³ R pour Reliability en anglais.

Indicateur n°1 : temps opératoire d'une opération sur une machine

$(a_j^k)_r$: Durée de l'opération o_j^k sur la machine r . Deux types d'opérations sont à étudier :

- les opérations o_j^k se trouvant dans le stock en amont de la machine i tombée en panne : $(d_j^k)_r$ correspond à la durée de l'opération sur la machine r .

- l'opération o_j^k en cours d'exécution sur la machine tombée en panne : Deux cas sont possibles :

- si o_j^k peut être reprise après la panne alors $(d_j^k)_r$ correspond à la durée résiduelle de o_j^k sur la machine r : $(d_j^k)_r = (d_j^k)_r - te$ où te : temps déjà effectué (temps écoulé avant la panne).

- si o_j^k est rebutée après une panne alors : $(d_j^k)_r$ est nulle.

Indicateur n°2 : temps de préparation d'une ressource pour une opération

$(Tp_r)_j^k$: Temps de préparation de la machine r pour l'exécution de l'opération o_j^k (le temps de chargement sur la machine étant inclus dans Tp).

Indicateur n°3 : temps de transfert

$(Tf_j^k)_{i \rightarrow r}$: Temps de transfert de l'opération o_j^k de M_i vers M_r . Cet indicateur mesure le temps écoulé entre le stock d'entrée ou de sortie de la machine tombée en panne et le stock d'entrée de la machine pouvant prendre en exécution l'opération bloquée.

Indicateur n°4 : prochain instant de disponibilité

Id : Prochain instant de disponibilité d'une machine. Deux cas sont à étudier :

- Id_r : Représente la date à partir de laquelle M_r sera capable d'exécuter l'opération bloquée. Une fois que la machine de réserve est déterminée, une mise à jour de son prochain instant de disponibilité est effectuée : $(Id)_r = (Id)_r + (d_j^k)_r$

- Id_i : Prochain instant de disponibilité de la machine en panne : $(Id)_i = Ip + MTTR_i$; avec Ip instant de panne et $MTTR$ étant le temps moyen de réparation.

4.3.3.2. *Le critère coûts (C) et ses indicateurs*

Un coût est une accumulation de charges sur un produit (bien ou prestation de service) à un certain stade de son élaboration. Les coûts pris en compte étant plus particulièrement ceux liés à l'opération suite à une panne machine, les deux indicateurs suivants seront considérés :

- indicateur n°1 : coût de production sur la machine M_r : (CPrd_r).
- indicateur n°2 : coût de stockage en amont de la machine M_r : (CSA_r).

4.3.3.3. *Le critère fiabilité (R) et ses indicateurs*

Le problème à résoudre est celui de choisir à l'instant t (instant de panne) la machine alternative la plus fiable, il s'agit de calculer l'intégrale de $R(t)$ ⁴ dans l'intervalle $[t, \infty]$.

$$MTTF = \int_0^t R(t)dt + \int_t^\infty R(t)dt ; MTTF = \int_0^t R(t)dt + (MTTF)'; \quad [4.4]$$

$$(MTTF)' = \int_t^\infty \exp(-\lambda t)dt = \frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t); \quad [4.5]$$

Choisir la machine la plus fiable revient à choisir la machine ayant le plus grand (MTTF)'. Il s'agit donc de maximiser $(1/\lambda) \exp(-\lambda t)$ ou de minimiser la fonction :

$$If_i = [1 - (MTTF)'] = 1 - (1/\lambda) \exp(-\lambda t) \quad [4.6]$$

L'objectif global est de choisir la "meilleure" machine dans un système flexible de production. Il s'agit d'intégrer une politique de réaffectation des opérations bloquées suite à une panne machine. Il est nécessaire de déterminer la "meilleure" politique de réaffectation des opérations bloquées permettant de trouver un compromis entre les différents critères. La figure 4.2 représente la structure hiérarchique (étape 1 de la méthode AHP décrite dans la section 4.3.2). La hiérarchie du processus de décision de réaffectation est définie par un quadruplé $\langle N_1, N_2, N_3, N_4 \rangle$ où :

- N_1 = niveau de l'objectif global (Og) : choisir la meilleure machine ;
- N_2 = niveau des critères (sous-objectifs) de N_1 ; $N_2 = \{T, C, R\}$;
- N_3 = niveau des indicateurs de chaque critère de N_2 ;
- $N_3 = \{[T, \{d, Tp, Tf, Id\}] ; [C, \{CPrd, CSA\}] ; [R, \{Rf\}]\}$;
- N_4 = niveau des alternatives (machines).

⁴ $R(t)$ est la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t.

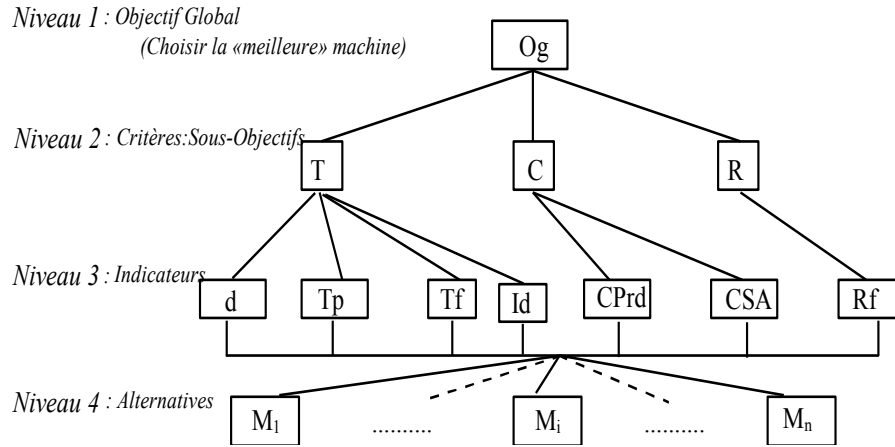


Figure 4.2. Hiérarchie du processus de décision de réaffectation

4.3.4. Algorithme multicritère de réaffectation et illustration

L'algorithme multicritère proposé, programmé sous Matlab 5.2, construit un vecteur de priorité représentant l'importance relative des alternatives (niveau 4 de la figure 4.2) par rapport à l'objectif global (niveau 1), ce qui permet de choisir la machine alternative appartenant à l'ensemble des machines pouvant prendre en exécution l'opération bloquée et procurant le "meilleur" compromis entre les critères de choix.

La première étape de l'algorithme consiste à établir un classement des critères (niveau 2) par rapport à l'objectif global (niveau 1), puis d'établir un classement des indicateurs (niveau 3) par rapport aux critères (niveau 2), ensuite de donner un classement des alternatives (niveau 4) par rapport aux indicateurs (niveau 3). Une fois le plus bas niveau (niveau 4) atteint, il faut remonter dans la hiérarchie, car le but est de déterminer l'importance relative des alternatives (niveau 4) par rapport à l'objectif global (niveau 1). Toutes ces étapes permettent d'obtenir un vecteur appelé vecteur de performance qui permet de guider le décideur dans le choix de la machine alternative.

Les différentes étapes de l'algorithme seront présentées dans ce qui suit tout en appliquant celui-ci à un exemple.

4.3.4.1. Description de l'exemple

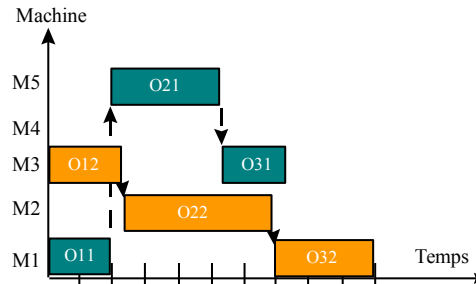
Le système de production flexible est composé d'un ensemble de machines caractérisées par des temps de réglage et capables d'exécuter une seule opération à la fois (capacité unitaire). Chaque produit est défini par un ensemble d'opérations, chaque opération peut être exécutée par différentes machines (gammes multiples). En d'autres termes, une gamme principale est définie ainsi qu'une gamme secondaire dite alternative⁵ dans la mesure du possible. Le temps requis par une opération peut être différent d'une machine à une autre. La préemption n'est pas autorisée, la seule exception à cette règle est le cas de panne. Nous supposons que le stock d'entrée et le stock de sortie ont des capacités infinies. L'ordonnancement prévisionnel est considéré comme une donnée déjà calculée. Nous considérons qu'une panne peut survenir sur une machine à tout moment (que la machine soit libre ou occupée). Toutes les opérations qui étaient affectées à cette machine sont alors bloquées.

4.3.4.2. Algorithme multicritère de réaffectation

Pour une meilleure compréhension, nous allons décrire l'algorithme multicritère tout en illustrant chacune de ses étapes (pour plus de détails concernant les calculs, se référer à [OUN 99c]). Considérons l'exemple d'un atelier comprenant cinq machines M_i ($i=1,5$) et deux produits P_k ($k=1,3$) nécessitant la réalisation de trois opérations o_j^k ($j=1,3$). Chaque produit passe par trois machines parmi les cinq. Nous associons à chaque machine des gammes multiples et la notion de potentiel qui est fonction des temps opératoires, des temps de préparation machine, des coûts de production, des taux de panne, des taux de réparation.

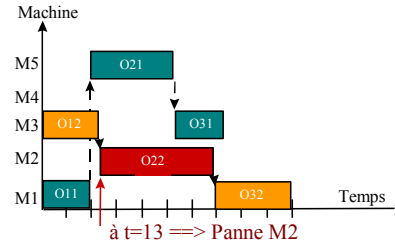
Le fonctionnement normal, obtenu par l'ordonnancement prévisionnel minimisant le temps total d'exécution, correspond au passage des produits P1 et P2 par les machines suivantes :

- $P_1 [M_1, M_5, M_3]$;
- $P_2 [M_3, M_2, M_1]$.

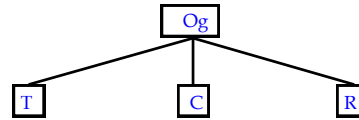


⁵ La gamme alternative définit un processus de fabrication légèrement différent mais tout aussi acceptable.

Nous étudions le cas de l'occurrence d'une panne machine à l'instant $t = 13$. Cet instant correspond à la panne de la machine M2, ce qui conduit au blocage de l'opération o_2^2 (opération 2 du produit P2). A partir des gammes multiples nous pouvons extraire l'ensemble des machines pouvant prendre en exécution cette opération : $MEOpB^6 = \{M1, M5\}$.



Etape 1: Il s'agit d'établir un classement des critères (niveau 2) par rapport à l'objectif global (niveau 1), ce qui est donné par la matrice [CC] ci-dessous.



[CC] =

Critères	T	C	R
T	1	1	3
C	1	1	3
R	1/3	1/3	1

La matrice [CC]⁷ permet de déterminer le vecteur de priorité [CrOg]. Ici, le critère temps (T) est légèrement plus important que le critère fiabilité (R) (cf. tableau 4.1).

Le calcul du coefficient de cohérence **C.R.** permet de corriger les poids affectés, si ces derniers ne sont pas cohérents, au niveau de l'étape et non pas à la fin de l'algorithme. Ceci permet un gain dans la simplicité et dans le temps de calcul dans la mesure où l'incohérence des comparaisons est détectée dès son occurrence.

Le vecteur finalement trouvé (CrOg) correspond au vecteur d'importance relative retenu. Il exprime l'importance relative des critères (niveau 2) par rapport à l'objectif global (niveau 1).

$$C.R. = 0$$

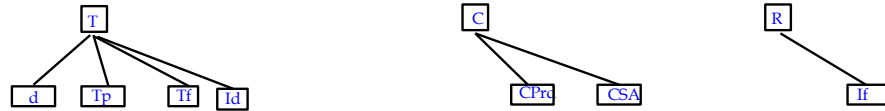
CrOg =

	Og
T	0.4286
C	0.4286
R	0.1429

⁶ MEOpB : Machines pouvant prendre en Exécution l'Opération Bloquée.

⁷ Seule la partie supérieure de la matrice est complétée par le décideur.

Etape 2 : Il s'agit d'établir un classement des indicateurs (niveau 3) par rapport aux critères (niveau 2).



Pour chaque critère $k \in [1..n_c]$ ⁸ (considérer le critère Cr_k du niveau N_2) suivre les pas suivants :

Etablir un classement de chacun des indicateurs par rapport à son critère correspondant. A cet effet, une matrice carrée $[Ind_k]$ est construite.

Prenons le cas de $k=1$ (critère Temps) la matrice Ind_1 obtenue est :

$Ind_1 =$

Indicateurs	d	Tp	Tf	Id
d	1	1/5	1	3
Tp	5	1	3	5
Tf	1	1/3	1	3
Id	1/3	1/5	1/3	1

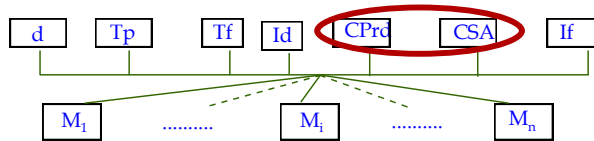
Estimer pour chaque matrice $[Ind_k]$ le vecteur de priorité $[ICr_k]$. Le vecteur retenu exprime l'importance relative des indicateurs (niveau 3) par rapport à chacun des critères (niveau 2).

C.R. = 0.0487, le vecteur ICr_1 trouvé correspond au vecteur d'importance relative des indicateurs par rapport au critère Temps (T).

$ICr_1 =$

	T
d	0.1677
Tp	0.5709
Tf	0.1866
Id	0.0748

Etape 3 : Il s'agit d'établir un classement des alternatives (niveau 4) par rapport aux indicateurs (niveau 3)⁹.



Pour chaque critère $k \in [1..n_c]$ (considérer le critère Cr_k du niveau N_2) suivre les pas suivants :

⁸ n_c étant le nombre de critères considérés, ici 3.

⁹ A cette étape il y a exploitation des données réelles (quantitatives). Il n'y a donc pas besoin de calculer le coefficient C.R.

Pour chaque indicateur $l \in [1, n_k]^{10}$ (considérer tous les indicateurs du niveau N_3 de chaque critère) Faire :

Etablir un classement des alternatives (machines) par rapport aux indicateurs de chaque critère. A cet effet, une matrice carrée $[M_{k,l}]$ est construite.

Estimer, pour chaque matrice $[M_{k,l}]$, le vecteur d'importance relative des alternatives par rapport aux indicateurs de chaque critère $[MI_{k,l}]$.

Fin pour l.

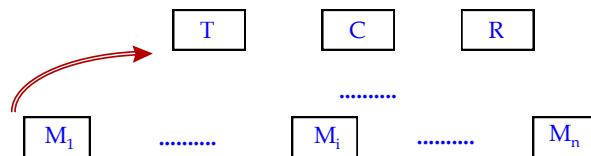
Une fois que le plus bas niveau (niveau 4) est atteint, il faut remonter dans la hiérarchie, car le but est de déterminer l'importance relative des alternatives (niveau 4) par rapport à l'objectif global (niveau 1). D'où la nécessité de construire la matrice $[MInd_k]$ où chaque colonne est un vecteur $[MI_{k,i}]$ et de recourir aux étapes suivantes 4 et 5.

Fin pour k.

Prenons le cas de $k=2$ (critère Coût), $l=1,2$ (deux indicateurs : CPrd et CSA entourés sur la figure ci-dessus)

$$MInd_2 = \begin{array}{|c|c|} \hline \mathbf{MI2_1} & \mathbf{MI2_2} \\ \hline 0.4046 & 0.4211 \\ \hline 0.4377 & 0.4211 \\ \hline \end{array}$$

Etape 4 : Il s'agit d'établir un classement des alternatives (niveau 4) par rapport aux critères (niveau 2).



Pour cela un vecteur donnant l'importance relative des machines par rapport aux critères est construit pour chacun des critères $k = 1, n_c$: $[MCR_k] = [MInd_k] \times [ICr_k]$. Les vecteurs $[MCR_k]$ permettent de construire une matrice $[MCR] = [MCR_1, MCR_2, \dots, MCR_{n_c}]$.

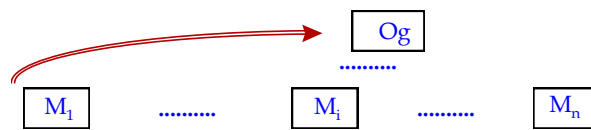
¹⁰ n_k étant le nombre d'indicateurs considérés, soit 4 pour le critère T, 2 pour C et 1 pour R.

M_{Cr_i} sont les vecteurs d'importance relative des alternatives par rapport à chaque critère 1, 2, 3 respectivement T, C, R.

$M_{Cr} =$

M _{Cr1}	M _{Cr2}	M _{Cr3}
0.1359	0.4087	0.4211
0.8378	0.4336	0.4211

Etape 5 : Il s'agit d'établir un classement des alternatives (niveau 4) par rapport à l'objectif global (niveau 1).



Le produit $[M_{Cr}] \times [CrOg]$ donne $[MOg]$, le vecteur de performance des machines considérées, c'est-à-dire l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif global (Og). Nous le désignons par $[P]$. Le vecteur de performance $[P]$ étant déterminé, il s'agit de choisir la machine de substitution. Pour cela il faut établir un classement du vecteur par ordre croissant. Le résultat est noté $[P']$. Deux cas sont possibles :

Le plus grand élément de $[P']$ est unique : cette valeur correspond donc à la machine de substitution qui va être choisie (c'est celle qui fournit le "meilleur" compromis entre les critères (la meilleure performance)).

Le plus grand élément de $[P']$ n'est pas unique : on laisse donc le choix à l'opérateur de choisir une des machines.

Le vecteur d'importance relative des alternatives (machines) par rapport à l'objectif global (choisir la meilleure machine de substitution) obtenu est :

$P =$

	Og
M1	0.29355
M5	0.60501

Le choix de la machine alternative porte donc sur la machine M5 puisqu'elle présente le meilleur compromis entre les différents critères de décision. Faisons remarquer qu'à partir d'une logique de premier niveau, nous aurions tendance à choisir la machine M1. En effet, à l'instant de panne, cette dernière est disponible. Nous illustrons ainsi tout l'intérêt de notre approche, puisque le choix de la machine alternative s'effectue en fonction de plusieurs critères et en considérant les préférences du décideur (le processus de décision est interactif).

4.4. Une approche coopérative : une méthode de réordonnement par réparation

Cette section présente une méthode de réordonnement par réparation coopératif. Les éléments constitutifs de cette méthode sont présentées après un bref état de l'art sur l'approche par réparation d'atelier. Nous l'illustrons ensuite sur un cas de coopération par insertion de tâche.

4.4.1. Principe de la réparation d'ordonnement

Dans, M. Zweben, E. Davis, B. Daun et M. Deale [ZEW 93], la réparation d'ordonnement permet de résoudre les conflits existants dans un ordonnancement prévisionnel en évitant sa remise en cause systématique. Ces mêmes auteurs ont prouvé que cette méthode minimise l'impact des perturbations dans les problèmes de réordonnement. Cette propriété apparaît essentielle pour considérer des systèmes physiques soumis à l'apparition d'événements imprévus.

Par ailleurs K. Miyashita [MIY 98] a montré l'adéquation de la réparation d'ordonnement avec une démarche de résolution coopérative de problème d'ordonnement. En effet, en limitant la zone de calcul, cette approche restreint le réordonnement à une machine de production tout en favorisant des négociations ou autres coopérations entre les différentes machines. Ainsi, le système CAMPS¹¹ proposé par Miyashita s'appuie sur un Système Multi-Agents (SMA) composé de trois types d'agent : (i) un *agent superviseur* (manager agent) représentant les demandes de clients, (ii) des *agents planificateurs* (planner agents) associés chacun à un produit, et (iii) des *agents ordonnanceurs* (scheduler agent) associés chacun à une ressource. Les conflits sur les ordonnancements calculés localement par les agents ordonnanceurs sont résolus par négociation entre les agents sur la base d'opérations de réparation.

La figure 4.3 ci-dessous illustre deux opérations de réparation : le décalage et la permutation de tâches.

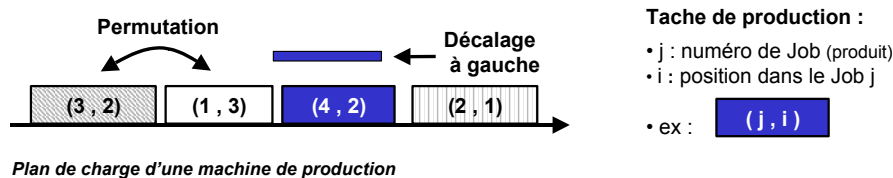


Figure 4.3. Exemple d'opérations de réparation d'ordonnement

¹¹ pour Constraint-based Architecture for Multiagent Planning and Scheduling

La mise en œuvre de ces opérations dans une méthode de réordonnement coopératif d'un atelier de production requiert cependant de préciser davantage les interconnexions entre les machines de production du fait des contraintes temporelles sur les tâches de production d'un même job.

4.4.2. Proposition d'une méthode de réordonnement coopératif

Les effets d'une perturbation interne sur un ordonnancement se traduisant en premier lieu sur les machines de production, la mise en œuvre de processus coopératifs entre ces dernières permet d'envisager des réponses adaptées d'un atelier face à des aléas de production. L'approche réparatrice, présentée précédemment, apparaît pertinente pour développer des mécanismes d'ajustement de nature et de complexité progressive selon l'importance d'une perturbation.

Nous précisons maintenant ces mécanismes en détaillant les opérations et stratégies de réparation définies dans un contexte de Résolution Coopérative et Distribuée de Problèmes (RCDP). Ensuite les critères de décision permettant d'évaluer les solutions ainsi obtenues seront présentés.

4.4.2.1. Opérations de réparation retenues

La méthode de réordonnement coopératif proposée donne la responsabilité de la gestion d'une perturbation en premier lieu aux machines de production. Ceci implique d'intégrer les différentes contraintes temporelles existant entre des tâches de production exécutées sur des machines différentes. Cette caractéristique est prise en compte en définissant les variables décisionnelles suivantes :

- Date de début au plus tôt : d_{\min}
- Date de fin au plus tard : d_{\max}

Ces dates de début au plus tôt et plus tard, ou *marges temporelles* mesurent le degré d'autonomie d'une tâche vis-à-vis d'autres tâches [TRA 98] et de son job. En conséquence, elles traduisent la forte interconnexion entre les ressources sur lesquelles sont effectués les calculs d'ordonnement. En d'autres termes, les marges temporelles synthétisent les contraintes d'une tâche vis à vis du plan de production et du job auxquels elle appartient (cf. équations 4.7 et 4.8 pour le calculs des marges temporelles).

$$d_{\min(j,i)-n_i} = \text{Max} (t_{n,i-1} + d_{n,i-1}, t_{j,i-1} + d_{j,i-1}) \quad [4.7]$$

$$d_{\max(j,i)-n_i} = \text{min} (t_{n,i+1} - d_{n,i}, t_{j,i+1} - d_{j,i}) \quad [4.8]$$

avec :

- t_x : la date de début de la tâche x
- d_x : la durée de la tâche x
- i : la position de la tâche x dans le job j
- n_i : la position de la tâche x dans le plan de charge de la machine sur laquelle x est exécutée.

L'équation 4.7 spécifie ainsi qu'une tâche x ne peut commencer avant que les tâches qui la précèdent (sur le plan et le job) soient finies. De même, l'équation 4.8 formalise qu'une tâche doit être terminée avant que les tâches qui la suivent commencent. Notons que pour les tâches se situant en fin de job, le calcul de d_{max} se base sur la date de livraison du produit correspondant au job. De manière symétrique, le calcul de d_{min} pour les tâches en début de job, utilise la date de lancement du produit. Ce choix permet ainsi d'uniformiser le traitement des tâches lors des calculs de réparation : pour qu'une opération de réparation soit réalisable il suffit que les tâches impliquées respectent leurs marges temporelles. Les dates de début doivent donc vérifier l'inégalité : $d_{min(i,j)} \leq t_{(i,j)} \leq d_{max(i,j)}$.

Dans ce contexte, un ensemble d'opérations de réparation ont été redéfinies pour les adapter à un contexte de Résolution Coopérative et Distribuée de Problèmes (RCDP) pour un réordonnement progressif :

- *Opérations effectuées sur une même machine* : décalage à gauche et à droite, permutation de tâches.
- *Opération effectuée sur deux machines distinctes* : transfert et échange de tâches, permutation simultanée de tâches¹².

Les opérations de réparation de la première catégorie sont effectuées en respectant les marges temporelles définies précédemment afin d'éviter la propagation incontrôlée de violations de contraintes d'une machine à l'autre. Ceci se traduit par contre par une diminution de l'espace des solutions envisagées. La seconde catégorie d'opérations élargit cet espace en mettant en œuvre des processus de résolution plus complexes impliquant des coopérations entre les machines de production. Précisons que cette notion de complexité (cf. critère $C(s)$ section 4.2.2.3) est appréhendée au travers de l'importance des modifications des plans de charge des machines de l'atelier résultant de l'application d'une solution de réparation.

Dans la section suivante, il est précisé comment ces opérations sont utilisées pour former une méthode de réordonnement coopératif cherchant à élargir progressivement l'impact d'une perturbation sur un atelier de production.

¹² La permutation simultanée de tâches consiste pour deux machines à permuter dans leur plan de charge deux tâches de production d'un même job afin de relaxer la contrainte temporelle de ces tâches.

perturbation s'est encore étendu. Si les tentatives de coopération précédentes n'aboutissent pas, M4 en informe le chef d'atelier (flèche 4.a). Ce dernier tente alors d'absorber la perturbation par le calcul d'un réordonnement complet des charges de travail des machines (*étape 4* et flèche 4.b). Le chef d'atelier peut également mettre en œuvre une coopération avec les autres ateliers de production (*étape 5*). Ces coopérations suivent par ailleurs des mécanismes similaires à ceux utilisés lors des coopérations intra-atelier décrits dans [BAI 94].

Si ces diverses stratégies échouent, la perturbation est transmise au responsable de production (flèche 6.a) afin qu'il puisse relâcher certaines contraintes (flèche 6.b) pour aboutir à une solution réalisable (*étape 6*). Ainsi, l'objectif de minimisation de l'impact de la perturbation est atteint en mettant en œuvre des mécanismes adaptés à son importance. Précisons que notre travail de recherche actuel s'attache plus précisément aux stratégies des étapes 1 et 2. Dans la section suivante nous montrons comment cet objectif est formulé en termes de critères d'évaluation des solutions ainsi obtenues.

4.4.2.3. Critères décisionnels

Les coopérations intra-atelier citées dans la section précédente s'appuient plus précisément sur le protocole *contract-net* [SMI 80]. Ainsi, lorsqu'une machine est sollicitée pour une coopération, elle vérifie tout d'abord qu'elle est apte à cette coopération (caractéristiques physiques de la machine adéquates), et calcule ensuite un ensemble de solutions dont elle ne retiendra que la meilleure. Cette solution est envoyée à la machine qui subit la perturbation et qui à son tour sélectionnera la meilleure des solutions proposées. L'évaluation d'une solution s'est effectuée sur la base des critères suivants :

- $C(s)$: Complexité de la solution.
- $R(s)$: Retard moyen résultant de l'application de la solution s .
- $M(s)$: Marge de manœuvre moyenne.

La *complexité moyenne* d'une solution (cf. équation 4.9) est calculée en fonction des opérations de réparation et de la stratégie employées ainsi que de la zone de propagation de perturbation qu'elle implique. A l'aide d'une pondération adéquate, les opérations de réparation type décalage seront favorisée par rapport à des opérations de transfert de tâches entre deux machines. Ceci traduit l'objectif de restreindre au maximum la zone d'influence de la perturbation. La complexité de la solution se calcule ainsi :

$$C(s) = S_s \times \sum_{i=1}^{op} n_i \times op_i \quad [4.9]$$

avec :

- s la solution d'ordonnancement ;
- S_s le poids de la stratégie employée pour obtenir s ;
- op le nombre d'opérations de réparation employées ;
- op_i le poids de l'opération de réparation i ;
- n_i le nombre d'opérations i utilisées.

Le *retard moyen* est calculé (cf. équation 4.10) en comparant les dates de débuts des tâches avant et après l'application éventuelle de la solution. Ceci traduit un objectif d'efficacité de la solution. Le calcul du retard moyen donne :

$$R(s) = \sum_{m=1}^M R_m(s) \quad \text{où} \quad R_m(s) = \frac{1}{N_m} \sum_{n_{-i}=0}^N (t_{i,j}^s - t_{i,j}) \quad [4.10]$$

avec :

- s : Solution d'ordonnancement ;
- M : Nombre de machines impliquées dans la solution ;
- m : Machine de production ;
- N_m : Nombre de tâches traitées par la machine m ;
- $R_m(s)$: Retard moyen de la solution s sur la machine m ;
- $t_{i,j}^s$: Date de début de la tâche (i, j) du plan de charge de m **après** s ;
- $t_{i,j}$: Date de début de la tâche (i, j) du plan de charge m **avant** s .

La *marge moyenne* de manœuvre est obtenue (cf. équation 4.11) en effectuant une moyenne des marges temporelles entre les tâches de production. Ce critère permet d'éviter de sélectionner les solutions conduisant à contraindre trop fortement l'ordonnancement de l'atelier et par conséquent à le rendre trop vulnérable à l'arrivée d'une nouvelle perturbation. Le calcul de la marge moyenne donne :

$$M(s) = \sum_{m=1}^M M_m(s) \quad \text{où} \quad M_m(s) = \frac{1}{N} \sum_{n_{-i}=0}^{N-1} (t_{n_{-i}} + d_{n_{-i}} - t_{n_{-i}+1}) \quad [4.11]$$

avec:

- s : Solution d'ordonnancement ;
- m : Numéro de la machine ;
- M : Nombre de machines impliquées dans la résolution ;
- n_{-i} : Position d'une tâche dans le plan de charge de m ;

- N : Nombre de tâches dans le plan de charge de m ;
- t_{n_i} : Date de début de la $n_i^{\text{ème}}$ machine ;
- d_{n_i} : Durée de la $n_i^{\text{ème}}$ machine.

4.4.4. Exemple de traitement coopératif d'une perturbation

La spécification des interactions résultant des stratégies de résolution coopérative nécessite un cadre de modélisation adapté pour lequel les Systèmes Multi-Agents (SMA) constituent une solution efficace [MUL 98]. Cependant, la modélisation des agents et le formalisme permettant de décrire leur comportement ne sont pas détaillés dans ce chapitre. Pour plus de détails nous renvoyons le lecteur à [TRA 99]. Retenons néanmoins que l'organisation proposée repose sur deux types principaux d'agents : (i) les agents *services* ; et (ii) les agents *ordonnanceurs*. Alors que les agents *services* assurent le bon fonctionnement du SMA indépendamment de son application, les agents ordonnanceurs représentent les acteurs de la méthode de réordonnancement coopératif et plus précisément les machines de production.

Afin d'illustrer le principe de la méthode de réordonnancement coopératif, nous étudions un cas de perturbation dans un atelier de production ainsi que les mécanismes qu'elle déclenche. Cette illustration s'appuie sur une simulation informatique effectuée sur le système MACSS (MultiAgent Cooperative reScheduling System) développé en Java et Jess (un générateur java de systèmes experts) [TRA 01].

Cette simulation considère trois tours M1, M2 et M3 chacun caractérisé par un outillage spécifique ainsi que par des limitations techniques sur les dimensions des pièces usinées. Ces contraintes peuvent ainsi empêcher que certaines coopérations ne soient possibles. Le cas considéré est une coopération par insertion de tâche dans laquelle une machine demande à une autre d'effectuer une tâche à sa place. La machine sollicitée doit ainsi essayer d'insérer la nouvelle tâche dans son plan de charge. La figure 4.5 montre les plans de charge de ces machines alors qu'une perturbation vient de doubler la durée de la tâche (2,2) sur la machine M3.

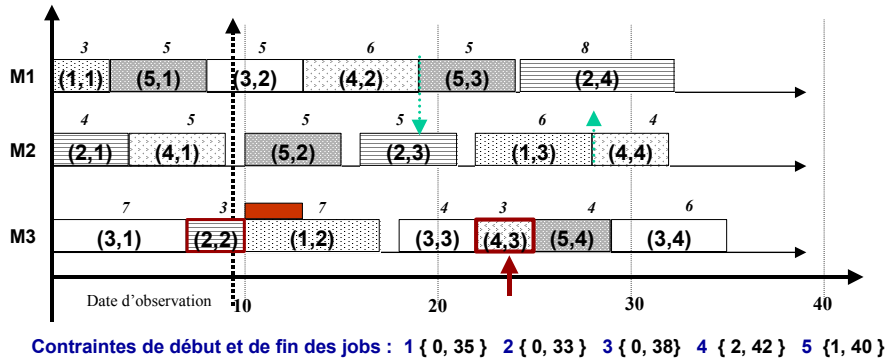


Figure 4.5. Plan de charge des machines de production avant la perturbation

La machine M1 ne dispose pas suffisamment de marges temporelles pour pouvoir accepter la tâche (4,3)¹³. M2 semble pouvoir le faire et effectue alors une série de décalage pour libérer le plus d'espace possible. Les flèches pointillées sur la figure 4.6, délimitent les contraintes d'antériorité sur la tâche (4,3). La figure décrit la solution calculée par M2. La coopération s'est révélée possible et la tâche (4,3) est transférée sur la machine M2 (cf. figure 4.6).

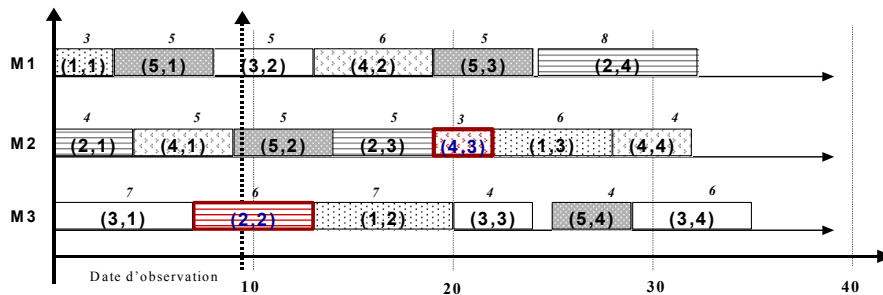


Figure 4.6. Solution trouvée par coopération entre M2 et M3.

La figure 4.7 décrit comment cette solution est représentée dans MACSS. Cette représentation comprend l'évaluation des critères de la section 4.4.2.3 (E étant la somme pondérée de ces critères), le plan de charge final mais également les opérations de réparation successives utilisées pour aboutir à cette solution. Ainsi, M2 a dû décaler à gauche les tâches (5,2) et (2,3) pour pouvoir insérer la tâche (4,3) dans son plan de charge.

¹³ Tâche sélectionnée pour cette coopération comme étant la tâche de plus courte durée du plan de charge de M3 (qui augmente les chances de succès de la coopération).

```

Solution 1
  >> C = 8.0, R = 0.5, M = -0.5 => E = 8.0 <<
Opérations de réparation :
Decal_gche de  ETache ( 3 )=( 5,2 ) .
Decal_gche de  ETache ( 4 )=( 2,3 ) .
Insere  ETache ( 5 )=( 4,3 ) .
Plan Final résultant : <INSERTION>
  ETache ( 1 )=( 2,1 )      Début 0 pendant 4sec.
  ETache ( 2 )=( 4,1 )      Début at 4 pendant 5sec.
  ETache ( 3 )=( 5,2 )      Début at 9 pendant 5sec.
  ETache ( 4 )=( 2,3 )      Début at 14 pendant 5sec.
  ETache ( 5 )=( 4,3 )      Début at 19 pendant 3sec.
  ETache ( 6 )=( 1,3 )      Début at 22 pendant 6sec.
  ETache ( 7 )=( 4,4 )      Début at 28 pendant 4sec.

```

Figure 4.7. Représentation d'une solution de réordonnement dans MACSS

La mise en œuvre de ces opérations de réparation au sein d'un système informatique a montré la faisabilité d'un réordonnement coopératif d'atelier. Elle a également confirmé l'importance des marges temporelles dans le processus de résolution notamment sur l'exemple de coopération par insertion présenté ici. Il est à noter que cette importance est cependant moindre dans les autres coopérations notamment dans le cas d'une coopération par échange de tâche consistant en fait en deux coopérations par insertion. Cette caractéristique souligne le caractère incrémental de la méthode : la définition d'une stratégie s'appuie sur celles qui la précèdent dans la chronologie de la figure 4.5.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au pilotage par tentative d'ajustement du plan prévisionnel. Nous avons tout d'abord, après avoir cerné ce que pouvait être une perturbation, présenté quelques approches de leur traitement selon des méthodes spécifiques.

Afin de prendre en compte, dans un premier temps, le caractère multicritère de la réaffectation des opérations bloquées suite à une perturbation, nous avons introduit une approche qualifiée de multicritère. La méthode multicritère proposée est basée sur la méthode AHP introduite par Thomas L. Saaty, Elle permet de prendre en compte les critères qualitatifs et les critères quantitatifs, de décomposer un problème complexe, de l'examiner en multiples niveaux et de mesurer la cohérence des comparaisons effectuées par le décideur. AHP est un processus de décision qui interprète directement les données et les informations en formant des jugements sur lesquels on exécute une échelle de mesure à l'intérieur d'une structure hiérarchique.

Notre objectif n'est pas de trouver une solution optimale mais plutôt de proposer un compromis efficace entre un certain nombre de critères. A cet effet, nous avons introduit la notion de "potentiel" associée à une machine-ressource et base de la prise de décision. Le potentiel est évalué au regard de trois critères : le temps induit par le changement de la ressource en panne, le coût lié à l'opération suite à la panne et la fiabilité de la machine alternative. L'algorithme multicritère proposé permet d'obtenir un vecteur de priorité représentant l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif global, ce qui permet de choisir la machine alternative, appartenant à l'ensemble des machines potentiellement capables de prendre en exécution l'opération bloquée, procurant le "meilleur" compromis entre les critères de choix. Notons que d'autres critères peuvent être considérés, dans le problème de la réaffectation suite à une panne machine, en fonction de la spécificité du système de production et/ou des objectifs de production.

Enfin, afin de prendre en compte le caractère distribué du système de production nous avons proposé une approche distribuée et coopérative de la perturbation s'appuyant sur une approche par réparation. La méthode qui en résulte traite la perturbation en donnant la capacité des machines de production de résoudre de façon coopérative les conflits issus de la perturbation.

Le recours à la coopération dans la gestion d'une perturbation réduit l'intervalle de temps séparant l'apparition de cette perturbation de sa prise en compte. La gestion s'appuie sur un modèle organisationnel dans lequel les machines de production constituent des centres de décision à part entière et non plus de simples données du problème. Par ailleurs, la définition d'un ensemble de stratégies de résolution permet de réagir de manière proportionnée à l'importance de la perturbation. Par l'implication d'unités de résolution autonomes capables de coopérer (les machines), cette méthode relève d'une Résolution Coopérative et Distribuée de Problème (RCDP) du domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD). L'apport de l'IAD se traduit par une modélisation de l'atelier de production respectant l'organisation hiérarchique de l'atelier en lui ajoutant une plus grande souplesse de réaction aux perturbations. Enfin, pour aboutir à une validation complète de la méthode de réordonnement coopératif, nous entendons mettre en œuvre cette méthode sur des cas industriels réels. Cette expérimentation permettra ainsi de mesurer la performance de la méthode et du système MACSS sur des situations de perturbations réelles.

Notons enfin que ces deux approches ne sont pas exclusives l'une de l'autre comme d'ailleurs des approches plus classiques évoquées. Il serait au contraire nous semble-t-il judicieux d'étudier une combinaison de l'approche multicritère et de l'approche coopérative. En effet, d'une part, en cas d'échec de la coopération, l'approche multicritère pourrait intervenir pour proposer (ou imposer) d'autres solutions de réordonnement, d'autre part, il serait envisageable d'utiliser un

réordonnement par l'approche multicritère au niveau de l'étape 4 sur la figure 4.4.

4.6. Bibliographie

- [ART 99] Artigues C., Roubellat F., Sancho F, "Caractérisation d'ensembles d'ordonnements admissibles avec prise en compte des activités de préoaraion des ressources". *Actes GI99*, pp 1533-1542, 1999.
- [BAI 94] P. Baillet, Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en oeuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision. Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix Marseille III, Novembre 1994.
- [BRO 99] N. Broissin, Contribution à l'amélioration de la réactivité des Systèmes de Production Automatisés et Flexibles grâce à un pilotage basé sur une Génération de Tâches Décentralisée. Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III, 1999.
- [BEL 92] V. Belton, M.D. Elder, "Can Multiple Criteria Methods Help Production Scheduling ?" *10th International Conference on M.C.D.M TAIPEI*, Taïwan, pp 341-349, 1992.
- [BIL 96] J.C. Billaut, F. Roubellat, C. Artigues, "Aide à la décision pour la prise en compte d'aléas en ordonnancement d'ateliers." *5^{ème} Congrès International de Génie Industriel (G.I.5)*, Tome 2, Grenoble, Avril 1996.
- [COL 91] A. Collinot et C. Le Pape, "Adapting the behavior of a Job-Shop Scheduling Système." *Decision Support Systems*, Vol. 7, 1991, Elsevier Science Pbs, North Holland, pp. 341-353, 1991.
- [DEC 82] R.F. Deckro, J.E. Herbert, and E.P. Winkofsky, "Multiple criteria job-shop scheduling." *Computer & operational research*, Vol. 9, N° 4, pp 279-385, 1982.
- [DHO 93] K. Dhoub, D. Aitkadi, A. Bouti, "Modélisation de cellules manufacturières utilisant des machines sujettes à des défaillances aléatoires." *4^{ème} Congrès International de Génie Industriel*, Marseille, France, décembre 1993.
- [ESP 98] B. Espinasse et E. Tranvouez, "Ordonnement d'atelier coopératif et réactif : une approche multi-agent", *Journal of Decision Systems*, Vol 7, Special Issue, pp 215-237, 1998.
- [GRA 92] M. Gravel, J.M. Martel, R. Nadeau., W. Price, and R. Trembly, "A multicriterion view of optimal resource allocation in job-shop production." *European journal of operational research*, Vol. 61, pp 230-244, 1992.
- [GRA 94] B. Grabot, L. Geneste, "Un système expert gérant les informations vagues et incertaines pour l'aide à la décision en pilotage d'atelier." *Revue des systèmes de décision*, Vol.3/n°2, 1994.

- [HAR 89] P-T Harker, "The art and science of decision making : The Analytic Hierarchy Process." *Golden B. L., Wasil E.A., Harker P.T., The Analytic Hierarchy Process : Applications and Studies, Springer-Verlag, 1989.*
- [HAU 96] L. Haudot, Une approche orientée utilisateur pour la conception des systèmes coopératifs en ordonnancement de production. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 1996.
- [PUJ 95] Patrick Pujo, Nicolas Broissin, Jean-Claude Bertrand, "Une Nouvelle Approche De L'ordonnancement Des Systemes De Production Automatisés Flexibles Par La Mise En Concurrence Des Ressources." *2^e Congrès International de Génie Industriel, Montréal-Canada, pp 415-423, octobre 1995.*
- [KAL 85] G. Kallel, X. Pellet et Z. Binder, "Conduite décentralisée coordonnée d'atelier." *APII, n° 19, pp. 371-387, 1985.*
- [KOR 92] P. Korhonen, H. Moskowitz, and J. Wallenius, "Multiple criteria decision support." A review, *European Journal of Operational Research, N° 63, pp 361-375, 1992.*
- [LEG 89] A. LE Gall, Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1989.
- [LEP 92] C. LE Page, "Programmation par contraintes et ordonnancement, réalités et perspectives." *2^{ème} Congrès des Systèmes Experts en Informatique de Gestion, Nice, France, 1992.*
- [LOP 95] P. Lopez, L. Haudot, P. Esquirol, M. Sicard : "Conception d'un système coopératif en ordonnancement de production. Une approche pluridisciplinaire." *5^{ème} Congrès International de Génie Industriel, Communication invitée, Grenoble, France, Avril 1996.*
- [MIY 98] K. Miyashita, "CAMPS : A Constraint-Based Architecture for Multiagent Scheduling." *Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 9, pp. 145-154, 1998*
- [MIY 94] K. Miyashita et K. Sycara; "Adaptive Case-Based Control of Schedule Revision." *Intelligent Scheduling, Chap. 10, M. Zweben et M.S. Fox Eds, Morgan Kaufmann Pbs, pp. 291-308, 1994.*
- [MUL 98] J-P. Müller et H. Van Dyke Parunak, "Multi-Agent Systems and Manufacturing." *INCOM'98, pp. 165-170, 1998.*
- [OUN 98] F. Ounnar, P. Ladet, "Prise en compte du mécanisme de décision dans la modélisation par réseaux de Petri des ateliers manufacturiers : Cas des perturbations du type " pannes-machines "." *Deuxième Conférence Internationale sur les Mathématiques Appliquées et les Sciences de l'Ingénieur (CIMASI'98), Casablanca-Maroc, pp 648-653. Communication invitée, 27-29 octobre 1998.*
- [OUN 99a] F. Ounnar, P. Ladet, "Modèle réseaux de Petri et mécanisme de décision dans la gestion des pannes machines." *2^{ème} congrès sur la Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR'99), Cachan-France, pp 91-100, 24-26 mars 1999.*
- [OUN 99b] F. Ounnar, P. Ladet, "Managing breakdowns machines : A Petri net model and decision making process." *European Journal of Automation, Ed. Hermès : "Modelling of reactive systems", Vol. 33, n° 8-9, pp 977-994, 1999.*

- [OUN 99c] F. Ounnar, Prise en compte des aspects décision dans la modélisation par réseaux de Petri des systèmes flexibles de production. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), décembre 1999.
- [ORG 95] Organiser les Ressources et Gérer les ALEAs (ORGALEA). Rapport d'activité-Programme thématique de recherche : Procesus Manufacturiers, Avril 1995.
- [POM 93] J.C. Pomerol, S. Barbara-Romero, "Choix multicritère dans l'entreprise." *Collection Informatique, Hermès*, Paris, 1993.
- [ROU 94] F. Roubellat, J-C. Billaut, et M. Villaumie, "Ordonnancement d'atelier en temps réel : d'ORBAID à ORDO." Journée D'étude "Ordonnancement et entreprise : Applications Concrètes et Outils pour le Futur", Toulouse, Juin 1994.
- [ROY 93] B. Roy, D. Bouyssou, "Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas." *Gestion Economica*, 1993.
- [ROY 85] B. Roy, "Méthodologie multicritère d'aide à la décision." *Economica*, 1985.
- [SAA 80] T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process." McGraw-Hill. Traduction française : "Décideur face à la complexité", *Entreprise Moderne d'Edition*, Paris, 1984.
- [SAA 96] T.L. Saaty, "Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process." Vol. I., RWS Publications Pittsburgh, 1996.
- [SAS 98] C. Sassine, Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers. Thèse, Grenoble, juillet 1998.
- [SMI 80] S. F. Smith, "The Contract Net protocole: high level communication and control in a distributed problem solver." *IEEE Transactions on computers*, 6 Decembre 1980 (disponible également dans Readings in DAI, Bond et Gasser Eds., 1988)
- [SMI 94] S.F. Smith, "OPIS a Methodology and Architecture for Reactive Scheduling." Intelligent Scheduling, Chap. 2, *M. Zweben et M.S. Fox Eds, Morgan Kaufmann Pbs*, pp. 66-94, 1994.
- [TAB 88] M.T. Tabucanon, "Multiple criteria decision making in industry." *Studies in production and engineering economics, N°8, Elsevier*, 1988.
- [TAB 94] M.T. Tabucanon, D.N. Batanov, D.K. Verma, "Decision support system for multicriteria machine selection for flexible manufacturing systems." *Computers in industry*, Vol. 25, N°2, pp 131-143, 1994.
- [THO 80] V. Thomas, Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel. Thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, Juin 1980.
- [TRA 01] E. Tranvouez, IAD et Ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par Systèmes Multi-Agents. Thèse de doctorat en Sciences, soutenue au DIAM, Mai 2001.
- [TRA 99] E. Tranvouez et B. Espinasse, "Protocoles de coopération pour le réordonnancement d'atelier." *Journées Francophone sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'99)*, Ile de la Réunion, Octobre 1999.

- [TRE 96] D. Trentesaux, Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production. Thèse, Grenoble, janvier 1996.
- [TRE 98] D. Trentesaux, R. Dindeleux, et C. Tahon, "A multicriteria decision support system for dynamic task allocation in a distributed production activity control structure." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 11, N° 1, 3-17, 1998.
- [ZEL 82] M. Zeleny, "Multiple Criteria Decision Making." *Mc Graw-Hill*, New York, 1982.
- [ZWE 93] M. Zweben, E. Davis, B. Daun et M. Deale, "Scheduling and Rescheduling with Iterative Repair." *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, Vol 23, n° 6, Nov-Dec 1993.