



HAL
open science

Systèmes multiagents et logique floue pour un ordonnancement cooperative production/maintenance.

Thierry Coudert, Bernard Grabot, Bernard Archimède

► **To cite this version:**

Thierry Coudert, Bernard Grabot, Bernard Archimède. Systèmes multiagents et logique floue pour un ordonnancement cooperative production/maintenance.. Journal of Decision Systems, 2004, 13 (1), pp.27-62. 10.3166/jds.13.27-62 . hal-03483231

HAL Id: hal-03483231

<https://hal.science/hal-03483231>

Submitted on 16 Dec 2021

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

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



Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID: 7946

To link to this article: DOI:10.3166/jds.13.27-62
<http://dx.doi.org/10.3166/jds.13.27-62>

To cite this version:

Coudert, Thierry and Grabot, Bernard and Archimède, Bernard *Systèmes multiagents et logique floue pour un ordonnancement cooperative production/maintenance*. (2004) *Journal of Decision Systems*, vol. 13 (n° 1). pp. 27-62. ISSN 1246-0125

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator:
staff-oatao@inp-toulouse.fr

Journal of Decision Systems

**Systèmes multiagents et logique floue pour
un ordonnancement cooperative production/
maintenance**

Thierry Coudert ^a , Bernard Grabot ^a & Bernard Archimède ^a

^a Laboratoire Génie de Production, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47, avenue
d'Azereix - B.P. 1629, F-65016, Tarbes cedex
Version of record first published: 18 Apr 2012.

Systèmes multiagents et logique floue pour un ordonnancement coopératif production/maintenance

Thierry Coudert — Bernard Grabot — Bernard Archimède

Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, avenue d'Azereix – B.P. 1629
F-65016 Tarbes cedex
thierry.coudert@univ-ubs.fr
{bernard, archi}@enit.fr

RÉSUMÉ. Dans une entreprise, plusieurs services sont directement intéressés par l'ordonnancement : production, mais aussi maintenance, approvisionnements ou gestion des ressources humaines. Nous montrons dans cet article comment le paradigme multiagent, souvent utilisé en ordonnancement pour son aspect distribué, peut aussi fournir un cadre permettant la coopération de différentes fonctions de l'entreprise en vue d'élaborer un ordonnancement. La production et la maintenance ont été choisies ici comme exemple, leurs activités étant souvent en conflit. Nous suggérons l'utilisation de la logique floue pour modéliser les degrés de liberté temporels des deux fonctions. Nous montrons comment cette approche permet d'obtenir un ordonnancement qui procure un meilleur compromis entre la satisfaction des objectifs respectifs des deux fonctions.

ABSTRACT. Within organisations, production is directly concerned with the scheduling manufacturing activities, but other services such as maintenance, purchasing or workforce management should also have an influence on this schedule. We show in this article how the multi-agent paradigm, often used in scheduling for its ability to distribute decision making, can also provide a framework for making several functions co-operate in the creation of the schedule. Production and maintenance have been chosen here as an example, their activities are actually often conflicting. We propose to use fuzzy logic in order to model the temporal degrees of freedom of the two functions, and we show that this approach may allow to obtain a schedule that provides a better compromise between the satisfaction of the respective objectives of the two functions.

MOTS-CLÉS : ordonnancement coopératif, maintenance, système multiagent, logique floue.

KEYWORDS: co-operative scheduling, maintenance, multi-agent system, fuzzy logic.

1. Introduction

Au sein des entreprises industrielles, plusieurs fonctions ont des liens très étroits avec la production au niveau opérationnel, même si leurs objectifs respectifs peuvent être partiellement en conflit. Ces fonctions sont par exemple :

- les *ventes*, dont l'objectif principal est de fournir au client le produit désiré à la date de livraison convenue ;
- la *maintenance*, ayant la charge d'assurer la disponibilité des moyens de production par des interventions curatives mais aussi préventives ou de nettoyage ;
- la *gestion des approvisionnements*, qui vise à assurer la disponibilité des matières premières et des composants ;
- la *gestion des ressources humaines*, dont un des objectifs opérationnels est de planifier l'utilisation des ressources humaines en fonction de contraintes techniques (compétence par exemple) mais aussi légales (temps de travail, annualisation, etc.).

Comme dans tout problème de contrôle-commande, les conflits possibles peuvent être évités par une coordination hiérarchique, ou résolus par négociation. En pratique, les variables d'actions respectives des fonctions sont toutefois habituellement réglées à moyen ou long terme, et ne sont pas remises en question lors de l'élaboration des décisions opérationnelles. Les tailles de lots, les niveaux de stocks, la définition des équipes ou les périodes de maintenance sont ainsi la plupart du temps définis une fois pour toutes et participent à l'ensemble de données qui contraignent l'ordonnancement.

Dans ce contexte, il est paradoxal de constater que, si le caractère multiobjectif de l'ordonnancement est reconnu depuis longtemps (Smith, 1992), il n'est que rarement évoqué que d'autres fonctions que la production doivent y participer. En pratique, les objectifs pris en compte sont habituellement relatifs à la satisfaction des clients (objectifs « externes » ou « exogènes » : liés au respect des délais, à la qualité, au taux de service, etc.) ou à la satisfaction de contraintes internes au systèmes de production (objectifs « internes » ou « endogènes » : minimiser les en-cours, maximiser le taux d'occupation des ressources, etc.), (Zülch *et al.*, 1994 ; Grabot, 1998).

En fait, des méthodes d'ordonnancement comme l'analyse sous contraintes (Fox, 1987) pourraient permettre de tenir compte sur un même plan de contraintes issues de fonctions différentes dans l'élaboration de l'ordonnancement, mais la division entre fonctions reste très présente dans le monde industriel. Cette division est d'ailleurs de plus en plus considérée comme un obstacle à l'amélioration des performances des entreprises. Ainsi, des techniques de réorganisation basées sur la notion de processus, comme le *Business Process Reengineering* (Hammer *et al.*, 1994) sont de plus en plus préconisées. Les méthodes de travail sont axées sur :

- un découplage des services et une amélioration de la communication interne et externe,

- un système de données techniques plus facile d'accès et d'utilisation,
- une décentralisation des structures,
- un recentrage des activités de production conduisant à sous-traiter celles pour lesquelles le système n'est pas spécialisé.

Dans un tel contexte, la notion d'intégration constitue un point essentiel de l'activité décisionnelle au niveau opérationnel. Les décisions prises s'appuient sur des informations issues de zones fonctionnelles distinctes dans l'organisation. Le système sera dit intégré si l'ensemble de ses activités décisionnelles ou de ses fonctions communiquent entre elles afin d'atteindre leurs propres objectifs et l'objectif global qui les fédère (ECOSIP, 1996). Ce besoin d'intégration fait clairement apparaître le besoin de négociation dans la mesure où l'apparition de conflits est inévitable. Chaque fonction concerne un métier, un service ou encore un site particulier dans l'entreprise, nécessitant des connaissances et des compétences propres que des acteurs spécialisés possèdent. Le savoir sur la résolution des problèmes est donc un savoir distribué et fragmenté. Chaque fragment est détenu par un acteur individuel mais personne ne détient la totalité (Lorino, 1991). Les problèmes devant être résolus dans l'entreprise sont donc traités par des acteurs distincts, chacun intervenant dans son domaine de compétence. Ainsi, même si les problèmes à résoudre ne sont pas des problèmes distribués à proprement parler, nous proposons de les aborder de manière décentralisée en raison des connaissances et des compétences des acteurs qui sont distribuées. Nous pensons donc que d'importants progrès peuvent être réalisés en fournissant aux décideurs des outils opérationnels pouvant gérer le processus de négociation entre fonctions et, plus particulièrement, entre centres de décision, à partir du moment où les objectifs de chaque fonction ont été clairement modélisés.

L'outil qui a été réalisé illustre le type de coopération possible lors de l'élaboration d'un ordonnancement sur le cas de la maintenance et de la production : ces fonctions, utilisant les mêmes ressources, sont en effet souvent sources de conflits dans les ateliers (voir par exemple Weinstein *et al.*, 1999). L'intérêt de cet exemple est encore augmenté par la nécessité actuelle de réduction des en-cours, rendant primordiale une meilleure disponibilité des machines. La nécessité de renforcer les liens entre production et maintenance est ainsi des plus forte (Swanson, 1999).

L'approche proposée ici est basée sur l'utilisation du paradigme multiagent ainsi que de la logique floue. Le choix du paradigme multiagent se justifie principalement par sa capacité reconnue à fournir un support à la distribution de la décision. Nous argumentons ce choix dans la section 2. La logique floue nous permet quant à elle de modéliser des objectifs, des préférences et d'envisager ainsi de négocier des compromis en cas de conflits entre production et maintenance.

Nous proposons dans la partie suivante de justifier l'approche par système multiagent dans nos travaux. Un panorama de travaux de recherche utilisables dans cette problématique est proposé dans la section 3. Des applications des systèmes

multiagents à l'ordonnancement sont tout d'abord présentées. Des études visant à faire coopérer production et maintenance sont ensuite décrites. Le cadre de notre développement est basé sur un système multiagent d'ordonnancement existant, RAMSES, qui est brièvement décrit dans la section 4. Le fonctionnement de RAMSES II, le système d'ordonnancement production/maintenance proposé, est détaillé dans la partie 5. Pour permettre la négociation, les degrés de liberté entre les parties impliquées doivent être exprimés avec le même formalisme. Nous montrons dans la partie 6 que la logique floue permet de modéliser les degrés de liberté temporels de la production et de la maintenance comme des fenêtres temporelles floues, ce qui permet de résoudre les conflits au moyen d'un processus de négociation qui est décrit. Les résultats de cette approche basée sur la négociation sont décrits dans la partie 7.

2. Choix du paradigme multiagent

De manière générale, quelques points clefs justifient le développement des systèmes multiagents. Ce sont : l'avancée technologique et l'extension des réseaux permettant une communication à grande échelle, la confrontation à des problèmes dont la répartition est inhérente, le besoin de modularité pour faciliter l'implantation et la conception et, enfin, l'effet de synergie qui permet de résoudre des problèmes d'une complexité globale élevée par des entités de conception plus simple (Dillenseger, 1996). La structure multiagent offre également une plate-forme intéressante pour supporter les systèmes d'information et faciliter l'intégration des différents centres de compétence dans l'entreprise, chacun d'entre eux pouvant être modélisé par un agent, la coopération des agents assurant la communication entre les centres (Kouiss *et al.*, 1995).

L'aspect agents autonomes coopérants en interaction cadre parfaitement avec la notion de centres de décision autonomes et coopérants ainsi qu'avec la notion d'intégration. La coopération permet de résoudre des conflits d'objectifs et de partage de ressources entre agents. Chaque agent est chargé de résoudre les problèmes qui lui ont été confiés grâce à ses propres méthodes, en fonction des messages qu'il reçoit et des connaissances dont il dispose.

La flexibilité des systèmes multiagents est également un atout majeur. Le modèle à base d'agents peut être progressivement enrichi par de nouveaux agents afin de développer des comportements plus performants du système de pilotage. Par exemple, la mise en place de nouvelles procédures visant à améliorer la qualité dans un atelier et nécessitant des ressources particulières pourra être prise en compte dans le modèle en ajoutant un agent dédié à la gestion des tâches de contrôle qualité et en spécifiant le protocole de coopération avec les autres agents déjà en place. Une réorganisation du système de production, dans le cadre de son implication dans un nouveau projet par exemple, n'impose pas nécessairement de reconception totale du

modèle, seuls les protocoles de coopération entre les modules intervenant dans le cadre du nouveau projet devant être spécifiés.

Une modélisation par système multiagent va permettre d'envisager directement une implantation informatique. En effet, la complexité des systèmes de production et des problèmes à résoudre rendent souvent nécessaire l'utilisation d'outils d'aide à la décision. Le développement, l'utilisation et la maintenance de tels outils peuvent être grandement facilités en adoptant une approche modulaire, flexible et permettant la réutilisation, comme l'approche multiagent. Cet aspect « aide à la décision » impose une contrainte supplémentaire à prendre en considération : l'utilisateur. On parle de Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) qui peuvent être définis très généralement comme des systèmes informatiques permettant à un utilisateur de piloter la résolution de problèmes complexes. Il s'agit donc d'un système homme-machine permettant à l'opérateur de mettre en œuvre, à travers un dialogue qu'il contrôle, une démarche de recherche heuristique (Trentesaux *et al.*, 1998). Les systèmes multiagents offrent l'avantage de permettre la prise en compte d'un utilisateur dans la modélisation et l'implémentation. Celui-ci a donc la possibilité d'interagir avec le système informatique pour résoudre les problèmes opérationnels tels que l'ordonnement d'atelier.

L'approche par système multiagent possède cependant certaines limites. En effet, les protocoles de coopération entre agents ne sont pas toujours aisés à spécifier. Il faut envisager tous les cas de figure et prévoir des processus de résolution pour tous les conflits potentiels. Dans certains cas de résolution, des problèmes de convergence nécessitant un temps de résolution important peuvent apparaître si les agents passent beaucoup de temps à négocier. S'agissant d'une approche distribuée, l'optimisation globale fait également défaut, chaque agent cherchant à satisfaire ses propres intérêts plutôt qu'un intérêt général.

Souhaitant satisfaire les objectifs souvent antagonistes de la production et de la maintenance, nous avons choisi dans le cadre de ces travaux d'établir les ordonnancements de ces deux fonctions par coopération à l'aide du paradigme multiagent.

La section suivante présente un panorama des approches d'ordonnement par système multiagent d'une part, et des méthodes de coopération entre production et maintenance d'autre part.

3. Panorama des approches

3.1. Approches multiagents pour l'ordonnement

Les systèmes multiagents offrent un cadre simple pour modéliser les différentes entités qui constituent un système de production : une classe d'agents peut représenter un type d'entité du système (machines, ordres de fabrication, opérateurs,

etc.) et permet ainsi d'encapsuler le comportement de chaque entité (objectifs, réaction aux événements, etc.). L'ordonnement est alors obtenu à partir du comportement local des agents, ce qui permet une distribution « naturelle » de la décision et facilite la réactivité. Un état de l'art d'approches multiagents dans le cadre de la production est proposé dans (Shen *et al.*, 1999), qui décrit plus de trente études différentes, parmi lesquelles beaucoup sont orientées vers l'ordonnement. La plupart de ces approches sont basées sur le protocole de communication du Contract-Net (Smith, 1980 ; Smith, 1990). Selon cette approche, une annonce concernant une tâche à accomplir est envoyée dans le système multiagent. Des offres sont réalisées par les agents capables d'accomplir la tâche. Les offres sont collectées et comparées, et un contrat est passé avec l'agent ayant fait la meilleure offre. YAMS (Parunak, 1987) est certainement la première approche issue du Contract-Net traitant de l'allocation de tâches dans un système de production : celui-ci est modélisé par une hiérarchie de cellules de fabrication, dans laquelle chaque nœud est modélisé par un agent. YAMS ne permet pas directement de générer un ordonnancement, mais il peut réparer une solution existante remise en question par une perturbation. Un autre logiciel d'ordonnement par système multiagent basé sur le Contact-Net a été suggéré dans (Saad *et al.*, 1997). Des agents modélisent les articles à réaliser et les machines, les objectifs de production étant de minimiser l'utilisation de ressources, les en-cours, et de respecter les dates de livraison. Quand un article entre dans le système, l'agent correspondant fait une annonce concernant ses opérations de fabrication. Pour chaque opération, des offres sont réalisées par les agents-machines « capables », incluant une date de début du travail et la liste des opérations déjà planifiées sur la machine. L'agent-article choisit la machine dont l'agent suggère la date de début la plus proche.

Le protocole du Contract-Net est encore utilisé dans Metamorph (Maturana *et al.*, 1999) : des agents modélisent une nouvelle fois les ressources et les produits, et sont coordonnés par des agents de niveau supérieur qui gardent une trace des machines dont les offres n'ont pas été retenues. Si une perturbation survient, une réaction peut être déclenchée en utilisant ces machines.

D'autres approches, comme celle décrite dans (Liu *et al.*, 1994), suggèrent un mécanisme de coordination nécessitant de définir le problème d'ordonnement comme un problème de satisfaction de contraintes. Des agents-ressources expriment les contraintes de capacité, tandis que les agents-tâches expriment les contraintes de séquençement entre opérations, ainsi que les dates de début au plus tôt et les dates de livraison souhaitées. Une approche similaire est suggérée dans (Miyashita, 1998) avec la différence que chaque agent traite son propre problème de satisfaction de contraintes de manière indépendante. Les conflits sont dans un deuxième temps résolus par un processus de négociation.

L'approche multiagent est encore utilisée pour réparer un ordonnancement (Tranvouez *et al.*, 1998). Elle peut être aussi appliquée au contrôle temps réel d'une cellule flexible (Sohier *et al.*, 1998), dans laquelle l'interaction entre des agents statiques modélisant l'environnement de production (robots, machines, etc.) et des

agents dynamiques (modélisant les pièces, les outils ou les programmes de commandes numériques) permettent de générer un scénario de production.

Ces études n'ont pas toutes les mêmes buts, et des différences peuvent être constatées entre les protocoles de communication utilisés. Néanmoins, elles ont des points communs importants :

- dans la plupart de ces approches, les agents qui modélisent les pièces ont en charge le respect des objectifs de production « externes », c'est-à-dire ceux relatifs à la satisfaction des clients, tandis que les agents modélisant les ressources ont en charge le respect des objectifs « internes », exprimant la nécessité de produire au meilleur coût ;

- les approches utilisant la propagation de contraintes ne permettent habituellement pas d'ajouter ou de relâcher de contraintes durant le processus de résolution, ce qui a pour conséquence la définition d'un cadre d'élaboration de l'ordonnancement relativement rigide. Un avantage est néanmoins que leur approche globale peut conduire à une meilleure solution ;

- le Contract-Net offre un cadre flexible de gestion des degrés de liberté qui peuvent exister dans les choix de ressources pour effectuer une opération. Un inconvénient est la relative myopie de la méthode, le choix d'une ressource étant habituellement basé sur une évaluation locale de la performance ;

- dans tous les cas, le processus de négociation doit être soigneusement contrôlé : de nombreux conflits de ressources doivent habituellement être résolus durant l'élaboration de l'ordonnancement, et la résolution de ces conflits peut demander un temps de calcul important. Par conséquent, il est important de n'introduire une possibilité de négociation que quand cela amène une nette amélioration par rapport à des techniques plus classiques.

3.2. *Coopération entre production et maintenance*

Différents types de maintenance doivent être distingués, car ils induisent différents types d'interaction avec la production (voir par exemple Paz *et al.*, 1994). Les catégories suivantes sont habituellement définies :

- la *maintenance curative* survient après une panne machine. Dans ce cas, il n'y a pas de conflit entre production et maintenance, puisque la machine n'est plus en état de produire ;

- dans le cas de la *maintenance préventive*, la décision d'effectuer une activité de maintenance n'est pas liée à l'occurrence d'une perturbation. Trois types de maintenance préventive peuvent être distingués :

- la *maintenance systématique*, caractérisée par une périodicité entre activités de maintenance, cette périodicité étant déterminée arbitrairement ou en fonction de lois de comportement des ressources,

- la maintenance *conditionnelle*, déclenchée par un symptôme, ou par l'atteinte d'un seuil sur une grandeur mesurée,
- la maintenance *prédictive*, basée sur l'occurrence d'événements qui peuvent conduire à une défaillance.

Ordonner les activités de maintenance est une problématique à part entière : la durée des activités de maintenance est en effet la plupart du temps connue de manière imprécise (Paz *et al.*, 1994) ; de plus, la date de début d'une opération de maintenance préventive peut être avancée ou différée par rapport à une date jugée « optimale » (Gits, 1994). De nombreuses études ont porté sur la composition des équipes de maintenance, comme (Basker *et al.*, 1982) et (Barnett *et al.*, 1981). L'efficacité et le coût de politiques de maintenance sont aussi souvent comparés (Paté-Cornell *et al.*, 1987 ; De Carvalho *et al.*, 1996 ; Kelly *et al.*, 1997).

Production et maintenance peuvent être liées par trois types de liens hiérarchiques :

- la production peut avoir une position hiérarchique supérieure, avec comme résultat que la maintenance préventive n'est effectuée que pendant les périodes de sous-charge. Cela peut être le cas quand des taux d'utilisation élevés des machines sont requis, particulièrement si les machines sont facilement maintenables ;

- la maintenance peut avoir un niveau hiérarchique supérieur; les activités de maintenance préventive sont alors positionnées en premier, et définissent ainsi des périodes de fermeture dans les calendriers des machines. Les opérations de fabrication sont planifiées dans un second temps ;

- la production et la maintenance peuvent être considérées comme appartenant au même niveau hiérarchique, requérant par là même une coordination ou une coopération. Coopération ou coordination sont particulièrement nécessaires lorsque les opérations de maintenance préventives doivent être effectuées souvent, ou lorsque ces opérations sont longues en comparaison avec les opérations de fabrication. Dans ce contexte, la coordination ou la coopération entre production et maintenance a plusieurs objectifs :

- s'assurer qu'un temps suffisant sera laissé par la production aux activités de maintenance,

- s'assurer que la maintenance peut intervenir au bon moment,

- s'assurer que la maintenance réagit rapidement à des défaillances de machines, (Gits, 1994 ; Rishel *et al.*, 1996 ; Swanson, 1999).

Dans (Rishel *et al.*, 1996) est décrite une approche dans laquelle la maintenance est traitée au même niveau que la production au sein d'un système MRP : le calcul des besoins est effectué pour les deux types d'activités et différentes politiques de maintenance sont testées et évaluées. Une méthode de programmation linéaire multiobjectif est proposée dans (Weinstein *et al.*, 1999), permettant une planification hiérarchisée pour les activités de production et de maintenance. Dans (Brandolese *et al.*, 1996), un atelier flow-shop est ordonnancé, et un modèle probabiliste tenant

compte des coûts et de la disponibilité calcule les fenêtres temporelles à l'intérieur desquelles les opérations de maintenance devraient être effectuées. D'autres travaux utilisent des approches probabilistes pour créer un plan de maintenance sur des lignes de production, comme (Sanmarti *et al.*, 1997) où, dans chaque intervalle de temps de l'horizon de simulation, un modèle permet de choisir entre produire et prendre les risques de voir une défaillance survenir, et effectuer une activité de maintenance préventive et voir les coûts augmenter. Une approche similaire est utilisée dans (Ashayeri *et al.*, 1996) : les activités de maintenance sont modélisées comme des ordres de fabrication fictifs et sont ordonnancés en même temps que les opérations de fabrication. Un cas industriel dans lequel la simulation est utilisée pour équilibrer activités de maintenance et de production est décrit dans (Deniaud *et al.*, 1999).

Dans toutes ces études, nous pouvons constater qu'un niveau de coordination supérieur est défini, ce qui peut nuire à la réactivité du système. D'un autre côté, cette coordination est moins consommatrice de temps de calcul qu'une coopération génératrice de négociations. Plus généralement, un système multiagent dans lequel chaque agent représente un centre de décision du système de production est proposé dans (Ayel, 1994). Les divers agents peuvent alors représenter différentes fonctions, et les conflits possibles entre fonctions sont résolus par négociation. Néanmoins, ce système vise principalement à synchroniser des activités, et non à coordonner différentes fonctions agissant sur la même ressource. Les résultats obtenus peuvent difficilement être transposés à la problématique de l'ordonnancement coopératif.

Comme nous l'avons dit plus haut, les systèmes multiagents peuvent constituer un paradigme intéressant pour la modélisation d'activités de négociation entre entités différentes; ces systèmes ont par ailleurs été efficacement utilisés en ordonnancement. Nous décrivons dans la partie suivante les modifications réalisées sur un logiciel d'ordonnancement multiagent existant (RAMSES) pour en faire un moyen de coordination entre production et maintenance dans l'élaboration d'un ordonnancement commun.

4. RAMSES : un logiciel d'ordonnancement multiagent

L'environnement RAMSES (ReActive Multi-agent SystEm for Scheduling) a été développé afin de tester des stratégies d'ordonnancement dans un contexte multiagent (Archimède *et al.*, 1998 ; Archimède *et al.*, 2001a ; Archimède *et al.*, 2001b). C'est donc un environnement relativement ouvert et flexible, qui permet par exemple de considérer des gammes variantes (une opération peut être effectuée par différentes machines dans des conditions différentes, des opérations peuvent être définies comme permutables, etc.) et d'associer différents objectifs aux agents. Le modèle multiagent de RAMSES est basé sur l'architecture décrite dans la figure 1.

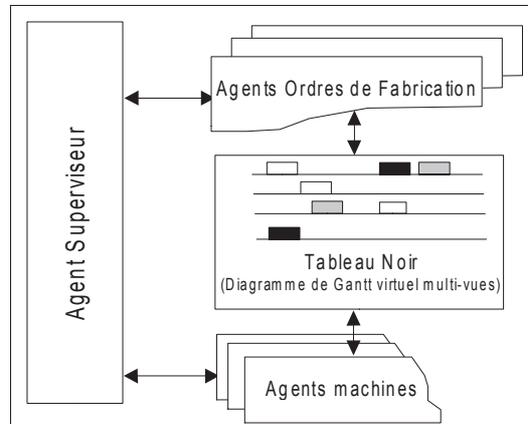


Figure 1. Architecture de RAMSES

Au début du processus d'ordonnancement, le superviseur crée et initialise les agents Ordres de Fabrication (OF) et Machines. Il est ensuite chargé du contrôle du processus de négociation entre les agents, qui se fait par l'intermédiaire d'un tableau noir décrivant l'état actuel de l'ordonnancement. Un agent OF doit planifier des opérations de fabrication décrites dans sa gamme et correspondant à des *activités* de fabrication telles que perçage, fraisage, etc., qui peuvent éventuellement être effectuées par différentes machines. Une machine a une certaine efficacité pour effectuer une activité, efficacité qui influe sur les temps de travail au moyen d'un coefficient de productivité. Les objectifs possibles d'un agent OF sont de minimiser son temps de cycle, de respecter sa date de livraison ou de minimiser ses coûts de fabrication (les machines ayant des taux horaires différents).

Chaque agent OF exprime des besoins par une offre contenant le nom de l'opération et ses caractéristiques (activité, temps opératoire minimum, date au plus tôt). Cette offre définit en fait une planification au plus tôt à capacité infinie qui est introduite sur le tableau noir, qui peut être interprété comme un diagramme de Gantt virtuel représentant l'état courant de la négociation à différents niveaux conceptuels. Les opérations y sont en effet tout d'abord associées à des activités, puis à des machines précises, certaines opérations étant définitivement positionnées tandis que d'autres peuvent être déplacées. Les agents machines font des enchères sur les opérations proposées par les agents OF. Ces enchères consistent à proposer un temps opératoire (tenant compte de leur coefficient de productivité), une date à laquelle l'opération peut être effectuée (tenant compte de l'occupation de la machine) et un coût de fabrication (basé sur le taux horaire de la machine). Deux enchères différentes sont faites par chaque agent machine : l'une propose un positionnement de l'opération tenant compte de toutes les enchères faites par la machine (*position effective*) tandis que l'autre suppose que l'enchère courante est la seule qui sera retenue (*position potentielle*). Chaque agent OF compare les différentes enchères

reçues des agents machines à ses objectifs, et peut accepter la position effective suggérée par un agent machine. Dans ce cas, le processus de négociation s'arrête. Si la position effective ne donne pas satisfaction, et si la position potentielle est bien meilleure, l'agent OF peut prendre le risque d'attendre, en espérant que cette position potentielle deviendra effective. Dans ce but, l'agent OF reformule son offre sur la base de la position potentielle.

La différence principale entre ce protocole et le Contract-Net est que, dans ce dernier cas, un ordre de fabrication est habituellement placé opération par opération, sans compétition avec les autres ordres de fabrication. Dans RAMSES, les OF sont en compétition pour chaque opération : l'ordre de traitement des OF a ainsi une importance moindre sur le résultat. D'autres originalités de RAMSES concernent la définition des gammes, par la notion d'activité mais aussi par la possibilité de définir des opérations permutable : ces possibilités permettent des degrés de liberté supplémentaires qui sont ainsi utilisables lors de la négociation. Le concept de position potentielle et position effective donne d'autre part la possibilité d'améliorer une première solution au cours du processus de résolution. Enfin, un processus de validation globale peut être utilisé pour valider en une passe toutes les opérations d'un ordre de fabrication, sur la base des positions effectives suggérées par les machines. Un graphe est alors construit, décrivant les choix possibles pour effectuer les opérations, et le chemin le plus favorable en fonction des objectifs retenus (principalement délai d'achèvement et coût) peut être adopté en une seule étape. Cette possibilité permet une vue plus globale sur le processus de fabrication, ce qui corrige en partie la myopie souvent inhérente à l'approche du Contract-Net.

RAMSES a été implémenté en C++ sur PC et utilise un interface Windows. Il a été développé en suivant le standard de communication CORBA et peut donc être utilisé à distance à travers un réseau.

Les modifications de RAMSES autorisant une coopération production/maintenance sont détaillées dans la partie suivante.

5. RAMSES II : un logiciel d'ordonnancement multiagent production/maintenance

5.1. Le système multiagent RAMSES_Maintenance

Comme cela a été souligné plus haut, ordonnancer des activités de maintenance ne peut pas être directement assimilé à ordonnancer des opérations de production. Dans un premier temps, un système multiagent dédié à la maintenance, RAMSES_Maintenance, a donc été dérivé de RAMSES. Ce système multiagent a nécessité les changements suivants, plusieurs types « d'ordres de maintenance » pouvant être planifiés :

– un ordre de maintenance préventive est caractérisé par une fenêtre temporelle souhaitée, dont la définition est discutée dans la section 5.2. Il est associé à une ou

plusieurs activités de maintenance décrites dans une gamme de maintenance. Chaque activité de maintenance requiert des ressources de maintenance (principalement opérateurs et outils) ;

– un ordre de maintenance conditionné est généré en fonction d'une condition relative à l'ordonnancement d'opérations de fabrication (ordonnancement d'opérations salissantes, ordonnancement d'une séquence donnée d'opérations, etc.). Ce type d'ordre de maintenance n'est pas associé à une fenêtre temporelle, et ne peut être créé que lorsque le système RAMSES_Maintenance est connecté à un système RAMSES_Production ;

– un ordre de maintenance corrective est associé à une machine. Il est caractérisé par une date de début au plus tôt et par un niveau de priorité ; il est lui aussi composé d'une ou plusieurs activités de maintenance. Un tel ordre de maintenance est planifié en cas d'ordonnancement réactif, en réponse à l'occurrence d'une défaillance. Il ne pourra donc être planifié que lorsqu'un système RAMSES_Maintenance est connecté à un système RAMSES_Production.

En mode autonome, l'agent superviseur de la maintenance active les agents des ordres de maintenance, qui proposent les annonces concernant les opérations qu'ils doivent effectuer sur le tableau noir. Les agents représentant les ressources de maintenance font alors des offres, avec un processus similaire à celui de RAMSES_Production. La principale différence est que les agents des ordres de maintenance ont pour critère de performance pour l'évaluation des offres le respect de leurs fenêtres temporelles de début, et non les dates de livraison comme dans RAMSES.

5.2. RAMSES II: Connexion de systèmes RAMSES_Production et RAMSES_Maintenance

Un environnement d'ordonnancement RAMSES II est composé de plusieurs systèmes multiagents RAMSES_Production et RAMSES_Maintenance dont les tableaux noirs sont actualisés simultanément pendant le processus de négociation. Chaque système RAMSES_Production représente un atelier, tandis que chaque système RAMSES_Maintenance représente un ensemble de ressources de maintenance (par exemple, une équipe). A l'intérieur du système multiagent de maintenance, un agent maintenance est créé pour chaque machine. Afin de simplifier les explications, nous allons illustrer le fonctionnement dans le cas d'un système de production et d'un système de maintenance. Deux nouveaux types d'agents ont été ajoutés aux systèmes standard présentés précédemment : un agent *utilisateur* et un agent *négoceur*.

Un agent « utilisateur », pour prendre en compte les actions directes de l'utilisateur humain pendant le processus d'ordonnancement. Les actions possibles à travers l'agent utilisateur concernent principalement les changements dans les règles qui définissent le comportement des agents machines, les changements d'objectifs

des agents ou la relaxation de divers types de contraintes. L'agent utilisateur permet aussi d'introduire l'occurrence d'une perturbation lors de l'exécution de l'ordonnancement.

Un agent « négociateur », chargé du processus de négociation. Cet agent n'a pas une position hiérarchique supérieure à celle des agents production ou maintenance, mais il peut accélérer les processus de négociation par sa connaissance de données venant des deux systèmes. La formulation du compromis entre les propositions effectuées par les agents production et maintenance, contenue dans le négociateur, peut être modifiée par l'agent utilisateur.

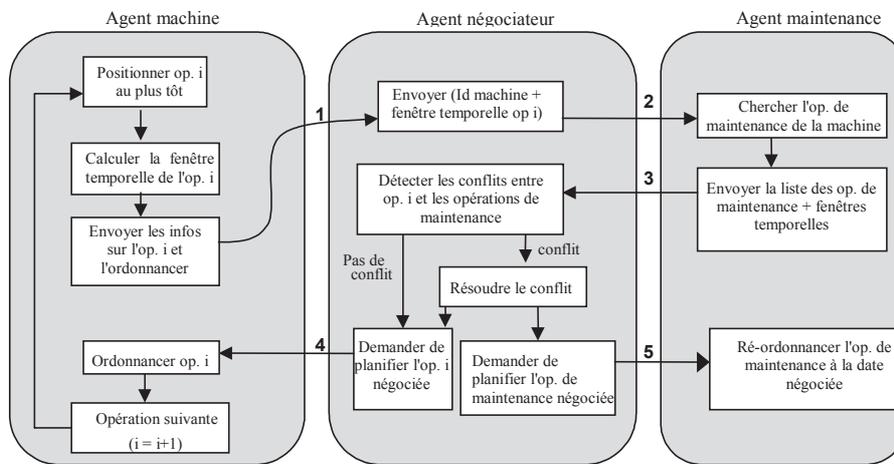


Figure 2. Coopération/négociation entre agents machine et maintenance

Quand des activités de maintenance préventive sont seules considérées, le processus de négociation se déroule comme résumé dans la figure 2 :

- quand une opération de fabrication doit être ordonnancée par un agent machine, une fenêtre temporelle illustrant la date au plus tôt et la date au plus tard possibles pour l'opération est calculée. Des détails sur cette fenêtre temporelle sont donnés dans la section 6. L'information est alors envoyée au négociateur (message 1) ;
- le négociateur demande à l'agent maintenance de la machine considérée si des activités de maintenance peuvent interférer avec la fenêtre temporelle de l'opération de fabrication (message 2) ;
- l'agent maintenance envoie la liste des activités de maintenance concernées avec leurs propres fenêtres temporelles (message 3) ;
- le négociateur vérifie s'il y a un conflit réel entre activité de maintenance et opération de fabrication. Si un positionnement des deux opérations est compatible

avec les contraintes exprimées dans leurs fenêtres temporelles, il n'y a pas de conflit et le négociateur demande à l'agent machine de planifier l'opération à cette position (message 4) ;

– s'il y a un réel conflit, c'est-à-dire si aucun positionnement ne permet de faire débiter les deux opérations à l'intérieur de leurs fenêtres temporelles, le négociateur suggère un compromis, demande à l'agent machine d'ordonner l'opération de fabrication à une certaine date de début (message 4) et demande à l'agent maintenance de réordonner l'activité de maintenance à une date de début qu'il suggère (message 5).

Quand des activités de maintenance conditionnelle sont considérées, le rôle du négociateur est légèrement modifié : si une opération de production doit être ordonnée, le négociateur vérifie si les conditions nécessaires à la création d'une activité de maintenance conditionnelle sont bien réunies. Dans l'affirmative, le négociateur demande à l'agent maintenance de créer un ordre de maintenance, puis calcule sa fenêtre temporelle. Une maintenance conditionnelle peut être stricte, c'est-à-dire qu'aucune opération de fabrication ne peut être planifiée sur la machine avant que l'activité de maintenance n'ait été effectuée, ou peut présenter une certaine tolérance de positionnement. Cette tolérance est décrite dans la fenêtre temporelle attachée à l'ordre de maintenance conditionnelle. Si l'activité de maintenance est obligatoire, il ne peut y avoir de conflit puisqu'elle doit être planifiée la première. Dans le cas contraire, le processus global de négociation comme décrit ci-dessus est entamé.

Dans la première version de RAMSES II, les fenêtres temporelles des opérations sont définies comme des intervalles précis (Coudert *et al.*, 1999). La satisfaction procurée par le positionnement d'une activité de maintenance est par conséquent binaire : elle est totale si l'activité débute à l'intérieur de sa fenêtre temporelle; elle est nulle dans le cas contraire. Comme cela a été évoqué ci-dessus, la réalité industrielle est plus subtile, le positionnement d'une activité de maintenance préventive étant sujet à préférence mais n'étant que rarement figé. Par exemple, il est clair qu'être en avance ou en retard de quelques heures n'est pas très significatif pour une activité de maintenance mensuelle. Un des intérêts bien connus de la logique floue est de proposer une alternative aux problèmes de seuils arbitraires : nous montrons dans la partie suivante comment le comportement du système a été rendu plus réaliste en modélisant les degrés de liberté disponibles au moyen de fenêtres temporelles floues.

6. Modélisation des degrés de liberté et résolution de conflits dans RAMSES II

Nous devons considérer dans notre modèle le fait que le placement temporel d'une tâche puisse être plus ou moins satisfaisant, le terme « plus ou moins satisfaisant » étant difficile à modéliser de manière formelle.

Le concept de *sous-ensemble flou*, proposé par L. A. Zadeh (Zadeh, 1965), permet des gradations dans l'appartenance d'un élément à une classe. Nous présentons brièvement ce concept de sous-ensemble flou (voir par exemple Zadeh, 1965 ; Dubois, 1987 ; Bouchon-Meunier, 1993) et son utilisation dans notre problématique.

Etant donné un ensemble de référence X, il est possible d'indiquer les éléments de X qui appartiennent à une certaine classe de X et ceux qui ne lui appartiennent pas. Si l'appartenance de certains éléments de X à une classe n'est pas absolue, on peut indiquer avec quel degré chaque élément appartient à cette classe. Celle-ci est alors un sous-ensemble flou de X défini par une fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément x de X, le degré d'appartenance $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1, avec lequel x appartient à A :

$$\mu_A : X \longrightarrow [0,1] \quad [1]$$

$$x \in X \longrightarrow \mu_A(x) \quad [2]$$

Nous adaptons ce concept à notre problématique afin de déterminer la fenêtre temporelle floue d'une tâche représentant l'ensemble des dates de début satisfaisantes pour cette tâche. Cette fenêtre temporelle floue va constituer les degrés de liberté temporels pour la tâche et servir par la suite à négocier des compromis en cas de conflit.

Soit D_{sat} le sous-ensemble flou qui représente l'ensemble des dates de début satisfaisantes. D_{sat} est inclus dans D, l'ensemble des dates de début possibles pour une tâche. D_{sat} est défini par sa fonction d'appartenance $\mu_{D_{sat}}$ qui associe à chaque date de début possible pour une tâche (notée dd) le degré d'appartenance $\mu_{D_{sat}}(dd)$, compris entre 0 et 1, avec lequel dd appartient à D_{sat} .

Nous pouvons considérer que la date de début d'une tâche (dd) appartenant à D est une variable linguistique représentée par le triplet (dd, D, satisfaisant). Le terme « satisfaisant » permet de caractériser la variable dd appartenant à D. Il est associé au sous-ensemble flou de fonction d'appartenance $\mu_{D_{sat}}$. Nous pouvons alors modéliser la proposition floue « le placement temporel de la tâche est satisfaisant ». Cette proposition floue est d'autant moins vraie que la date de début dd satisfait mal la caractérisation « satisfaisant », c'est-à-dire que $\mu_{D_{sat}}(dd)$ est faible.

Par la suite, nous parlerons de « degré de satisfaction du placement d'une tâche » pour désigner le degré d'appartenance $\mu_{D_{sat}}(dd)$, autrement dit, la valeur reflétant le caractère plus ou moins vrai de la proposition floue « le placement temporel de la tâche est satisfaisant ».

L'utilisation de la logique floue pour modéliser des contraintes dans les problèmes d'ordonnancement lorsque celles-ci sont imprécises, incertaines ou

sujettes à préférences a été largement abordée dans la littérature. Par exemple, dans (Kerr *et al.*, 1989 ; Fargier, 1997 ; Fortemps, 2000), la logique floue est utilisée pour modéliser des durées opératoires imprécises, des contraintes temporelles flexibles ou sujettes à préférences (dates de début au plus tôt, dates de fin au plus tard des opérations, dates d'échéance des ordres de fabrication, etc.). Le problème d'ordonnement d'ateliers est alors souvent abordé par des méthodes de propagation de contraintes. Dans (Ishibuchi *et al.*, 2000), les problèmes d'ordonnement classiques sont reformulés grâce à la notion de dates d'échéance floues suivant différents critères de résolution (retard maximum, retard total, pénalités de retard ou d'avance des ordres de fabrication, date de fin maximale, nombre d'ordres en retard, etc.).

Les résultats de l'ensemble de ces travaux vont nous servir de cadre pour notre propre problématique. Notre objectif est différent dans le sens où nous ne cherchons pas à faire de l'ordonnement flou, mais à caractériser des degrés de liberté temporels pour ensuite être en mesure de négocier des compromis entre production et maintenance lors de la recherche d'une solution d'ordonnement.

Ainsi, nous allons montrer dans les parties suivantes comment des fenêtres temporelles floues peuvent être définies pour les dates de livraison, ainsi que pour les dates de début des opérations de fabrication et des activités de maintenance. Le degré de satisfaction procuré par la localisation d'une opération (maintenance ou fabrication) nous fournira un moyen d'évaluer les compromis réalisés, étape indispensable en vue d'une gestion efficace du processus de négociation.

6.1. Modélisation floue d'une date de livraison

La modélisation par un ensemble flou de la préférence attachée au respect d'une date de livraison « a » a été introduite dans (Kerr *et al.*, 1989). Cette approche est désormais classique en ordonnancement. Nous avons choisi ici de représenter la satisfaction procurée par une date de livraison par un ensemble flou du type de celui représenté dans la figure 3, exprimant que l'ordre de fabrication peut être en avance (satisfaction totale, c'est-à-dire $\mu(t) = 1 \forall t < a$) et qu'un retard devient progressivement inacceptable (satisfaction décroissant de $\mu(t) = 1$ jusqu'à $\mu(t) = 0$ pour $a < t < b$). Dans la figure 3, la dernière opération de fabrication est représentée par un rectangle hachuré. Sur cet exemple, la satisfaction de la contrainte de date de livraison est $\mu(t) = 0,3$.

Ce type de modèle est à notre avis plus cohérent avec la réalité industrielle qu'une évaluation binaire. Dans certains cas, la date de livraison peut toutefois rester une contrainte rigide (départ d'un camion ou d'un bateau, réel juste à temps avec le client, etc.).

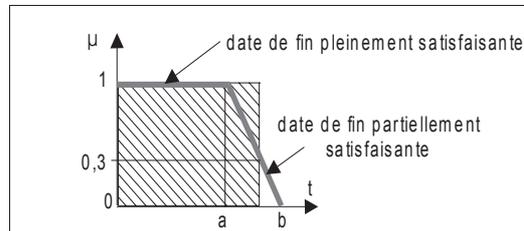


Figure 3. Modélisation floue d'une date de livraison

6.2. Modélisation floue de la date de début d'activité de maintenance

Déterminer de manière formelle les limites d'une fenêtre temporelle pour une activité de maintenance ne peut se faire que pour un contexte, une politique de maintenance et un équipement bien particulier. Le point de vue d'un expert du domaine est d'un poids élevé dans le choix de ces paramètres. Dans ce contexte, des modèles basés sur le coût des interventions et la probabilité d'apparition de défaillances peuvent fournir un cadre générique pour déterminer les limites d'une fenêtre temporelle, comme proposé dans (Brandolese *et al.*, 1996).

Dans ces méthodes, pour un équipement du système, un modèle basé sur la probabilité d'apparition de défaillances, le coût de maintenance préventive et le coût de maintenance corrective permet d'estimer le coût total de maintenance par unité de temps de production en fonction de la période d'inspection T (période séparant deux interventions). Cette fonction, dont l'allure est représentée sur la figure 4, passe par un minimum (coût optimal) correspondant à la période d'inspection optimale (T_{opt}). Ce modèle est classique en maintenance. De nombreux ouvrages et travaux dans le domaine y font référence (voir par exemple Joshi *et al.*, 1986 ; Boitel *et al.*, 1987 ; Brandolese *et al.*, 1996).

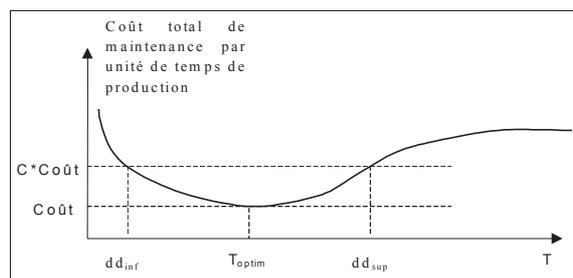


Figure 4. Coût total de maintenance en fonction de l'intervalle entre deux interventions

Pour déterminer la fenêtre temporelle d'une intervention, il suffit d'évaluer le coefficient multiplicateur C . Il correspond à une augmentation de coût « acceptable » par rapport au coût optimal. Ainsi, nous obtenons les limites inférieure (dd_{inf}) et supérieure (dd_{sup}) de la fenêtre temporelle associée à une activité de maintenance. Une activité de maintenance ayant sa date de début comprise entre ces deux bornes possède une position temporelle considérée comme satisfaisante, le coût total engendré étant acceptable. Par contre, en dehors de ces limites, le coût de maintenance est jugé trop élevé et la position temporelle est considérée comme non satisfaisante.

Dans ce modèle, le coefficient multiplicateur C peut difficilement être déterminé de manière formelle. Seul un expert peut décider si une telle augmentation du coût de maintenance conserve un caractère acceptable ou non. Dans ce contexte, il nous paraît peu réaliste de fixer des limites strictes à la fenêtre temporelle, d'où l'intérêt d'utiliser les fenêtres temporelles floues (figure 5).

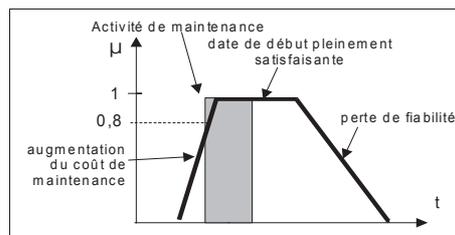


Figure 5. Date de début préférée pour une activité de maintenance

La courbe représentée sur la figure 4 nous permet de justifier l'allure de la fenêtre temporelle floue d'un ordre de travail de maintenance (figure 5). La pente montante de gauche peut être interprétée comme une préférence croissante traduisant le fait qu'une intervention de maintenance débutant trop tôt est peu satisfaisante. La période entre deux interventions va diminuer, le nombre d'interventions augmenter et, par conséquent, le coût total estimé de maintenance va augmenter sans amélioration notable de la fiabilité et de la disponibilité de l'équipement. La pente descendante de droite peut être interprétée également comme une préférence décroissante due au fait que l'intervention débute trop tard. Dans ce cas, l'équipement voit sa fiabilité diminuer et donc le risque de défaillance augmente. L'apparition d'une défaillance nécessitant une intervention de maintenance corrective entraînant un coût supplémentaire imprévu de non-utilisation de l'équipement, provoque une augmentation du coût total estimé de maintenance. Le noyau de l'ensemble flou traduit le fait que si l'ordre de travail débute dans cette fenêtre temporelle, le coût de maintenance induit est totalement acceptable.

La courbe de la figure 4 utilisée comme critère pour construire une fenêtre temporelle floue n'est présentée ici qu'à titre d'exemple, les préférences des décideurs pouvant également être utilisées comme critère.

6.3. Modélisation floue de la date de début d'une opération de fabrication

La fenêtre temporelle floue attachée à une activité de maintenance nous semble constituer une extension réaliste des fenêtres de maintenance « classiques ». Mener à bien un processus de négociation requiert toutefois de modéliser les degrés de liberté des deux partenaires : il est donc nécessaire d'être capable de décrire les degrés de liberté associés à la date de début d'une opération de fabrication. La difficulté est que RAMSES_Production effectue un ordonnancement d'une manière en s'appuyant sur une gestion de files d'attente (quand une machine peut effectuer plusieurs opérations, l'agent machine choisit leur ordre d'après une règle de priorité). Par conséquent, le système ne définit pas de fenêtre temporelle pour les opérations de fabrication. Néanmoins, d'autres techniques utilisables en ordonnancement, comme l'analyse sous contraintes (Erschler *et al.*, 1976) reposent sur la définition de telles fenêtres : les contraintes qu'elles expriment sont propagées jusqu'à trouver un ordonnancement admissible. Même si cette méthode n'est pas utilisée dans RAMSES, nous avons utilisé cette approche en vue de définir les fenêtres temporelles des opérations de fabrication. La fenêtre de la n -ième opération de fabrication est définie en plaçant les opérations précédentes de sa gamme au plus tôt, et les opérations suivantes au plus tard. Les dates de fin de l'opération ($n-1$) et de début de l'opération ($n+1$) définissent la fenêtre temporelle de l'opération n . Nous aurions pu utiliser ces fenêtres temporelles précises dans RAMSES II, mais cela aurait eu pour conséquence un déséquilibre entre les activités de maintenance, dont la localisation peut procurer une satisfaction partielle, et les opérations de fabrication dont la satisfaction serait 1 ou 0. Il nous a donc semblé intéressant de définir un modèle permettant de décrire jusqu'à quel point la contrainte décrite dans une fenêtre temporelle est relaxable. Dans la figure 6, nous montrons une façon possible de définir un tel degré de relaxation. Le support de l'ensemble flou décrivant la position préférée (c'est-à-dire les points pour lesquels $\mu(t) \neq 0$) est la période de temps entre la première date de début possible de l'opération (position 1 dans la figure 6) et la dernière date de début possible, qui correspond à la position 2.

Considérons maintenant la marge de l'opération à planifier, définie comme le temps disponible entre la fin de l'opération et la date de livraison souhaitée, diminué de la somme des durées opératoires des opérations de fabrication restant à effectuer (voir figure 6). Pour déterminer quelles positions procurent une complète satisfaction (ce qui correspond au noyau de l'ensemble flou, c'est-à-dire l'ensemble de points pour lesquels $\mu(t) = 1$), nous proposons de partager la marge entre les opérations restant à planifier (opération considérée + opérations restantes). Dans la figure 6, trois opérations restent à planifier en plus de l'opération considérée. La marge est donc répartie entre les quatre opérations, et nous considérerons que la date

de début de l'opération à planifier donne pleinement satisfaction si l'opération ne consomme au maximum que cette part de marge. Cette marge est donc équivalente à la marge libre de la méthode PERT. Si le début de l'opération est en dehors du noyau de l'ensemble flou ainsi défini, la marge libre des opérations suivantes est progressivement consommée, jusqu'à ce qu'il devienne impossible d'achever l'OF pour la date de livraison prévue. Après la position 2 de la figure 6, la satisfaction procurée devient donc nulle. La marge de départ est donc bien l'équivalent de la marge totale d'une opération dans la méthode PERT.

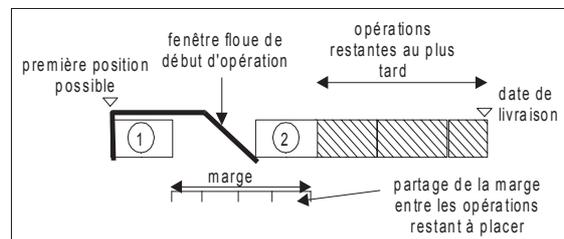


Figure 6. Fenêtre temporelle floue d'une opération de fabrication

Si la date de livraison est elle-même floue, la date de livraison de la figure 6 est remplacée par le dernier point de la date de livraison floue présentée dans la figure 3 (point pour lequel $\mu(t) \neq 0$). S'il n'est pas possible de satisfaire la contrainte de date de livraison (c'est-à-dire position 1 = position 2 et (fin de dernière opération > date de livraison)) on peut considérer que seul un début immédiat de l'opération est satisfaisant : la fenêtre temporelle floue est alors réduite à un point. Notons d'autre part que le premier front de la fenêtre temporelle est vertical puisqu'il est défini par la première localisation possible de l'opération à planifier.

Nous allons dans la partie suivante expliciter plus précisément le processus de négociation de la figure 2, en présence de ces fenêtres temporelles floues.

6.4. Résolution de conflit par négociation en présence de fenêtres temporelles floues

Nous considérons dans ce paragraphe qu'une opération de production et une activité de maintenance sont en conflit. C'est-à-dire que la maintenance désire réaliser une intervention de maintenance préventive en même temps que la production veut réaliser une opération de production sur une machine. Le processus de résolution d'un conflit consiste à déterminer de nouvelles dates de début pour l'opération de production et pour l'activité de maintenance. Ces nouveaux

placements doivent permettre d'obtenir des degrés de satisfaction des placements les plus proches possibles de 1 dans les fenêtres temporelles.

En préalable à ce processus de négociation, les agents de maintenance doivent être en mesure de détecter les conflits entre activités de maintenance et opérations de fabrication à planifier. Avec la notation proposée dans la figure 7, la condition de conflit est que :

$$(b1 + L1 > c2) \text{ ET } (b2 + L2 > c1) \quad [3]$$

Nous définissons deux types de conflits : les *conflits totalement solubles* et les *conflits solubles par recherche de compromis*. Pour un conflit totalement soluble, l'opération de production et l'activité de maintenance se chevauchent, mais il est possible de trouver une solution telle que le degré de satisfaction du placement de chacun soit égal à 1. En revanche, pour un conflit soluble par recherche de compromis, il est impossible d'obtenir un degré de satisfaction du placement de 1 pour les deux tâches et il est nécessaire de rechercher un compromis.

Afin de déterminer le type de conflit, considérons l'exemple de la figure 7 où l'opération de production et l'activité de maintenance sont en conflit. L'une des conditions suivantes doit être vérifiée pour que le conflit soit totalement soluble.

$$(b1 + L1 \leq c2) \text{ OU } (b2 + L2 \leq c1) \quad [4]$$

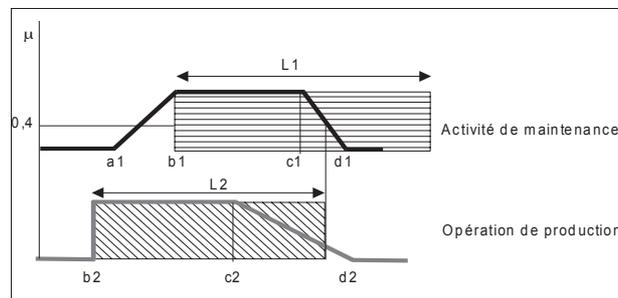


Figure 7. Exemple de conflit entre production et maintenance

Si aucune des deux conditions n'est respectée, alors le conflit est soluble par recherche de compromis.

Quel que soit le type de conflit, nous allons, pour le résoudre, simuler la solution où l'opération de production est planifiée en premier et l'activité de maintenance à la suite, puis la solution où l'activité de maintenance est planifiée en premier.

6.4.1. Résolution d'un conflit totalement soluble

Dans le cas où le conflit est totalement soluble, il existe au moins une solution qui donne un degré de satisfaction de 1 pour le placement des deux tâches et il s'agit donc de déterminer quelle est cette solution. Pour simuler la solution « production avant maintenance », l'opération de production est planifiée « au plus tôt » et la maintenance à la suite (exemple de la figure 8a). Pour simuler la solution « maintenance avant production », l'activité de maintenance est planifiée au plus tôt de telle sorte que le degré de satisfaction de son placement soit égal à 1 et l'opération de production est planifiée à la suite (exemple de la figure 8b).

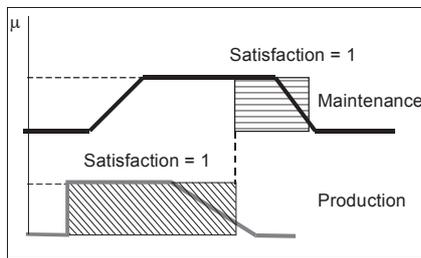


Figure 8a. Simulation de la solution « production avant maintenance »

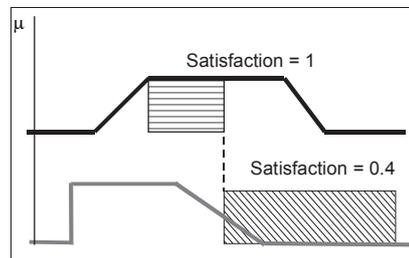


Figure 8b. Simulation de la solution « maintenance avant production »

Dans l'exemple précédent, seule la solution « production avant maintenance » donne un degré de satisfaction de 1 pour le placement des deux tâches, ce sera donc la solution retenue. Si les deux solutions donnent un degré de satisfaction de 1 pour les deux tâches, un choix arbitraire doit être effectué.

6.4.2. Résolution d'un conflit soluble par recherche de compromis

Dans le cas où le conflit est soluble par recherche de compromis, nous devons rechercher la solution qui fournit le meilleur compromis. Nous simulons donc, comme au préalable, les solutions « maintenance avant production » et « production avant maintenance ».

Nous proposons, pour l'obtention d'un compromis, de rechercher des dates de début pour l'activité de maintenance et pour l'opération de production qui maximisent le plus petit degré de satisfaction du placement. Dans ce cas, il s'agit d'instancier dd_{op} , la date de début de l'opération de production op et dd_{AM} , la date de début de l'activité de maintenance AM , de telle sorte que soit maximisé $\min(\mu(dd_{op}), \mu(dd_{AM}))$.

Dans le cas de la simulation de la solution « maintenance avant production » (figure 9a), ceci est obtenu lorsqu'on a égalité des deux degrés de satisfaction, soit

$\mu(dd_{op}) = \mu(dd_{AM})$. La date de début de l'opération de production, dd_{op} , est donnée par l'équation [5] :

$$dd_{op} = dd_{AM} + L1 \quad [5]$$

L'égalité des deux degrés de satisfaction est donnée par l'équation [6] :

$$\frac{dd_{AM} - a1}{b1 - a1} = \frac{d2 - dd_{op}}{d2 - c2} \quad [6]$$

Nous obtenons ainsi la valeur de dd_{AM} , de telle sorte que soit maximisé $\min(\mu(dd_{op}), \mu(dd_{AM}))$:

$$dd_{AM} = \frac{a1.(d2 - c2) - (b1 - a1).(L1 - d2)}{(d2 - c2) + (b1 - a1)} \quad [7]$$

Cas particuliers :

Dans le cas de la simulation de la solution « maintenance avant production », il existe un cas particulier tel que :

$$(d2 - c2) + (b1 - a1) = 0 \quad [8]$$

Ce cas particulier correspond à une situation où la fenêtre temporelle floue de l'activité de maintenance présente un front vertical à gauche et celle de l'opération de production un front vertical à droite.

Pour ce cas particulier, la solution au conflit est donnée par les dates de début suivantes :

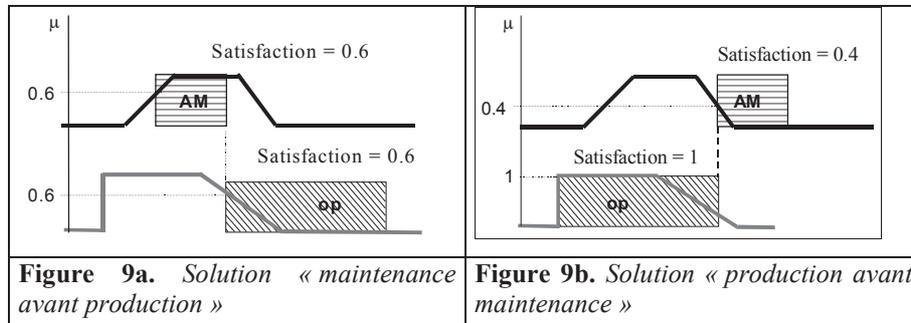
$$dd_{op} = b1 + L1 \quad [9]$$

$$dd_{AM} = b1 \quad [10]$$

Dans le cas de la simulation de la solution « production avant maintenance », l'opération de production est planifiée au plus tôt et l'activité de maintenance à la suite (figure 9b). La solution qui maximise le plus faible degré de satisfaction est alors donnée par les dates de début suivantes :

$$dd_{op} = b2 \quad [11]$$

$$dd_{AM} = b2 + L2 \quad [12]$$



6.5. Indicateur de satisfaction d'un compromis

Il s'agit de déterminer, à partir des degrés de satisfaction $\mu(dd_{op})$ et $\mu(dd_{AM})$ des placements de l'opération et de l'activité de maintenance, un indicateur reflétant la satisfaction globale du compromis obtenu dans la simulation d'une solution. Cet indicateur doit permettre ensuite de déterminer la « meilleure solution ». Il faut donc définir un opérateur d'agrégation applicable sur les deux degrés de satisfaction du placement des tâches. Si nous considérons en première approche que maintenance et production ont la même priorité, le choix d'un opérateur d'agrégation est contraint par les conditions aux limites suivantes :

- si les deux opérations ont des positions pleinement satisfaisantes, le résultat agrégé doit être égal à 1,
- si l'une des positions procure une satisfaction nulle, le résultat global doit être égal à 0.

Plusieurs possibilités sont envisageables pour cet opérateur d'agrégation et nous proposons ici quelques opérateurs couramment employés pour ce type de problème (pour un panorama plus complet, voir par exemple Dubois *et al.*, 1989).

Opérateur Max : la satisfaction globale est donnée par « le meilleur placement » simulé. Cet opérateur est trop peu discriminant et il ne respecte pas les conditions aux limites.

Opérateur Moy : la satisfaction globale est obtenue en faisant la moyenne des deux degrés de satisfaction. Cet opérateur reflète bien la qualité du compromis obtenu, mais dans certains cas, la discrimination ne sera pas suffisante. Prenons le cas où $\mu_1(dd_{op}) = 1$ et $\mu_1(dd_{AM}) = 0$ pour la première solution et $\mu_2(dd_{op}) = 0,5$ et $\mu_2(dd_{AM}) = 0,5$ pour la deuxième. La satisfaction globale vaut 0,5 pour les deux solutions, indiquant donc une qualité de compromis identique alors que la deuxième solution donne un compromis *a priori* plus équitable. De plus, la première solution donne un degré de satisfaction du placement de l'activité de maintenance nul, ce qui signifie que sa date de début a été négociée en dehors de sa fenêtre temporelle. Cette solution ne respecte pas les conditions aux limites.

Opérateur X : la satisfaction globale est obtenue en multipliant les deux degrés de satisfaction. Cet opérateur permet de discriminer suffisamment les deux solutions obtenues et s'affranchit du problème évoqué pour l'opérateur de la moyenne. Un degré de satisfaction de l'un des placements nul donne un degré de satisfaction global nul, ce qui permet de rejeter cette solution. Dans l'exemple proposé pour l'opérateur Moy, si nous appliquons l'opérateur X aux degrés de satisfaction, l'indicateur de satisfaction globale vaut 0 pour la première solution et 0,25 pour la seconde. La seconde solution est donc « meilleure » que la première.

Opérateur Min : la satisfaction globale est donnée par « le plus mauvais » placement simulé. Cet opérateur possède des qualités identiques à l'opérateur X pour notre utilisation.

C'est ce dernier opérateur qui a été retenu pour les tests présentés à la section 7, bien que d'autres opérateurs puissent permettre d'exprimer des relations complexes entre maintenance et production (valeur moyenne pondérée, etc.). L'optimisation multicritère peut aussi permettre de traiter ce problème d'agrégation. Une campagne d'essais a également été réalisée en utilisant l'opérateur X. La très faible différence entre les résultats fournis par l'opérateur Min et l'opérateur X ne nous permet pas de tirer de conclusions quant aux performances de l'un ou de l'autre dans notre cas d'étude (cf. section 7.2).

Après application d'un opérateur d'agrégation pour chaque solution simulée, il est possible de sélectionner la « meilleure solution », c'est-à-dire celle qui donne l'indicateur de satisfaction globale le plus grand.

6.6. *Prise en compte de la capacité des ressources*

Nous avons jusqu'à maintenant implicitement considéré que les ressources requises pour effectuer les activités de maintenance étaient toujours disponibles, ce qui revient à avoir effectué un ordonnancement à capacité finie sur les ressources de fabrication, mais infinie sur les ressources de maintenance. Comme cela a été expliqué plus haut, différentes ressources peuvent être disponibles pour effectuer une activité de maintenance. Dans ce cas, le protocole de négociation illustré dans la figure 2 est modifié comme suit.

Quand l'agent maintenance identifie qu'une activité de maintenance est requise sur une machine, il réagit comme un agent de production, c'est-à-dire qu'il envoie une annonce aux ressources de maintenance, décrivant le type de l'activité de maintenance et la fenêtre temporelle requise. Chaque ressource de maintenance a son propre tableau noir, c'est-à-dire son Gantt virtuel décrivant ses périodes d'occupation. Elle peut donc générer un calendrier montrant les périodes de temps pendant lesquelles elle peut effectuer l'activité suggérée. Une enchère incluant le calendrier de toute ressource potentielle est ainsi envoyée aux agents maintenance par les agents ressources qui peuvent effectuer l'activité de maintenance. L'enchère

qui satisfait le mieux les objectifs de maintenance est sélectionnée. Dans cette première version du système, l'évaluation concerne seulement le respect du positionnement de l'activité de maintenance, puis le coût, dépendant du taux horaire des ressources engagées. La ressource dont le calendrier présente la plus grande intersection avec la fenêtre de l'activité de maintenance est sélectionnée. Le test de stratégies plus complexes, basées sur des techniques d'optimisation multicritères, est actuellement envisagé.

La fenêtre temporelle de la ressource sélectionnée est envoyée au superviseur, qui essaie de trouver les meilleures positions pour les activités de maintenance et de production, selon le protocole détaillé auparavant.

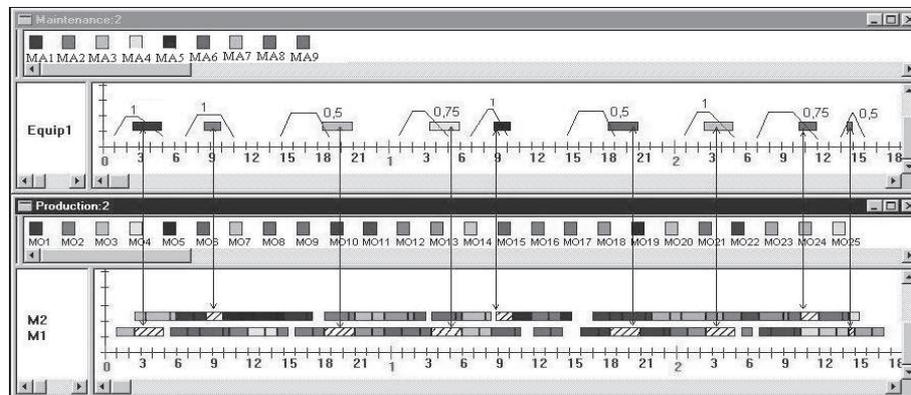


Figure 10. Exemples d'ordonnancement production/maintenance après négociation

7. Exemples et résultats

7.1. Exemples d'ordonnancement

Un premier exemple de résultat est montré dans la figure 10, obtenu avec vingt-cinq ordres de fabrication utilisant deux machines sur lesquelles neuf activités de maintenance doivent être effectuées. Le diagramme de Gantt supérieur montre le planning de l'équipe de maintenance (une seule équipe est considérée ici) tandis que le diagramme de Gantt inférieur montre l'ordonnancement des opérations sur les ressources de fabrication. Sur ce diagramme, les opérations de fabrication sont représentées par des rectangles grisés, les activités de maintenance étant représentées par des rectangles hachurés. Les deux diagrammes de Gantt peuvent être visualisés sur différents postes de travail, le processus de négociation pouvant se dérouler à travers le réseau en utilisant le protocole CORBA.

Les ensembles flous représentant la préférence accordée aux débuts des activités de maintenance ont été dessinés sur le Gantt supérieur pour une meilleure clarté des

explications, et les degrés de satisfaction procurés par le positionnement de chaque activité de maintenance sont donnés. On peut constater sur la figure 10 que, après processus de négociation, les activités de maintenance 3, 4, 6 et 8 ont été retardées, tandis que l'activité 9 est effectuée plus tôt que désiré. Pour les activités de maintenance 1, 2, 5 et 7, il a été possible de trouver une position procurant un degré de satisfaction égal à 1.

L'utilisation d'activités de maintenance conditionnelle est illustrée dans la figure 11. Deux activités de 60 mn et trois de 30 mn ont été positionnées sur les plannings de production et de maintenance : ces activités sont conditionnées par les opérations de fabrication suivantes. Elles modélisent donc ici des activités de réglage. Si elles sont conditionnées par les opérations de fabrication précédentes, elles peuvent par exemple modéliser des opérations de nettoyage.

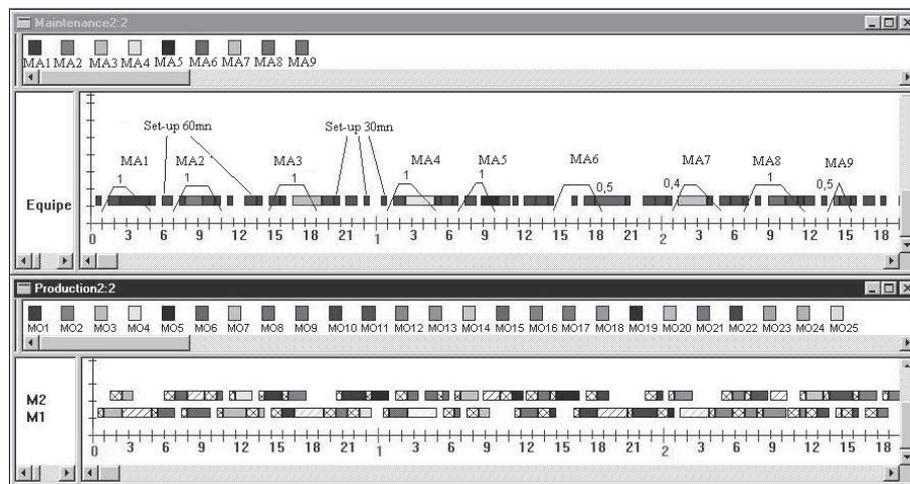


Figure 11. Diagrammes de Gantt avec activités de maintenance préventives et conditionnelles

Un inconvénient de cette méthode est que le processus d'enchères et de négociation est très consommateur en temps de calcul. Toutefois, lorsque l'on y regarde d'un peu plus près, le temps nécessaire ne dépend pas seulement de la négociation, mais principalement du nombre de ressources qui peuvent effectuer une activité, et qui envoient donc des offres en réponse aux enchères. Illustrons cela sur l'ordonnancement suivant :

- production : 50 ordres de fabrication, 6 machines dans l'atelier, 6 opérations par gamme ;
- maintenance : 24 activités de maintenance, 1 activité de maintenance par jour sur chaque machine, 1 équipe de maintenance.

Le temps nécessaire pour effectuer un ordonnancement en fonction du nombre d'activités que peut effectuer une machine est montré sur la figure 12. Le processeur utilisé ici est très lent (un Pentium à 133 Mhz), mais nous sommes davantage intéressés ici à la comparaison entre valeurs qu'aux valeurs elles-mêmes.

Nombre d'activités par machine	Production	Production + Maintenance
1	0:00:06	0:01:41
2	0:00:27	0:08:50
3	0:00:30	0:19:27
4	0:00:45	0:30:15
6	0:01:30	1:26:40

Figure 12. Temps nécessaire pour calculer un ordonnancement

Nous pouvons constater dans la figure 12 que le temps nécessaire pour effectuer un ordonnancement par l'intermédiaire d'un processus de négociation production/maintenance croît de manière exponentielle avec le nombre d'activités que peut réaliser chaque machine de l'atelier. Chaque fois qu'une activité de maintenance est en conflit avec une opération de fabrication, le choix de la ressource de fabrication est remis en question si la résolution du conflit ne permet pas une satisfaction totale des deux protagonistes. Ce cas arrive ici très souvent; en conséquence, la gestion des degrés de liberté induits par la notion d'activité fait augmenter le temps de calcul de manière exponentielle. En fait, cette augmentation de temps de calcul peut être limitée si des seuils sont définis pour la satisfaction procurée par le positionnement des opérations de maintenance et de fabrication, l'allocation de machine n'étant remise en cause que si la satisfaction passe en dessous de ces seuils.

7.2. Conditions de tests et résultats

L'intérêt de la négociation entre production et maintenance dépend étroitement des caractéristiques des ateliers et des gammes : par exemple, si les machines n'ont pas une charge importante, planifier d'abord les activités de maintenance à leur position optimale, puis planifier les opérations de fabrication « autour » de ces activités ne devrait pas induire de différence importante par rapport au processus de négociation. D'un autre côté, le gain de satisfaction globale procurée par la négociation devrait croître avec le nombre de conflits réels, ce qui nécessite que l'atelier soit chargé de manière importante, mais aussi que des degrés de liberté existent dans le positionnement des opérations.

Le bon sens suggère que les principaux facteurs ayant une influence sur l'intérêt de la négociation soient :

– l'intervalle de temps séparant deux activités de maintenance. Une activité de maintenance préventive effectuée chaque mois est clairement moins perturbante que si elle survient deux fois par jour ;

– la durée comparée des opérations de fabrication et de maintenance. Plus les activités de maintenance sont longues comparées aux opérations de fabrication, plus elles devraient être perturbantes ;

– les degrés de liberté existants pour le positionnement des activités de maintenance (modélisés par les ensembles flous décrits dans la figure 5). Si peu de degrés de liberté existent, le processus de négociation devrait être inefficace.

Pour vérifier ces hypothèses, nous avons défini un ensemble de tests combinant différentes valeurs des caractéristiques précédentes. Trois valeurs ont été retenues, « faible », « moyen » et « important », ces valeurs étant définies comme suit.

Fréquence d'activités de maintenance (FM) :

- faible : une activité de maintenance tous les 4 jours,
- moyen : une activité de maintenance tous les 2 jours,
- important : une activité de maintenance par jour.

Durée de maintenance (DM). La durée de chaque activité de maintenance sera tirée suivant une loi uniforme dans les intervalles suivants :

- faible : durée moyenne $\bar{d} = 60$ mn, $d_{\min} = 30$ min, $d_{\max} = 90$ mn,
- moyen : $\bar{d} = 180$ mn, $d_{\min} = 90$ min, $d_{\max} = 270$ mn,
- important : $\bar{d} = 360$ mn, $d_{\min} = 180$ min, $d_{\max} = 540$ mn.

Contraintes sur le positionnement des activités de maintenance (PM). Cette contrainte est faible quand la taille de la fenêtre temporelle est importante, et inversement :

- faible : noyau=120mn, support=600mn,
- moyen : noyau=60mn, support=240mn,
- important : noyau=30mn, support=120mn.

Un test noté « IMF » signifie ainsi que la fréquence des activités de maintenance est importante, que les durées de ces activités sont moyennes et que les contraintes sur le positionnement des activités de maintenance sont faibles. Lorsque ces valeurs sont combinées, certains des tests générés apparaissent comme peu réalistes : par exemple, effectuer deux fois par jour des activités de maintenance de 3 heures de durée moyenne induit des contraintes très fortes et atypiques. Par conséquent, nous avons sélectionné 20 jeux d'hypothèses parmi les 27 possibles. Pour chaque jeu d'hypothèses, 95 ordonnancements ont été effectués sur différents ateliers, générés comme suit :

- un atelier est constitué de 5 machines,
- 10 gammes comprenant chacune 5 opérations sont créées. La durée de chaque opération varie entre 30 et 135 mn,

– 40 ordres de fabrication sont générés avec leurs dates de livraison, chacun d’eux étant associé à une des gammes précédentes, tirée au hasard. A chaque opération est ensuite associée une machine de l’atelier, elle aussi tirée au hasard.

Afin de pouvoir évaluer l’intérêt de la négociation production/maintenance, nous avons choisi de comparer les résultats obtenus avec ceux de deux autres ordonnancements : l’un dans lequel les activités de maintenance ont systématiquement priorité par rapport aux opérations de production, l’autre dans lequel les activités de production sont prioritaires.

Dans la suite, nous nous sommes principalement intéressés au retard des ordres de fabrication, ainsi qu’au degré de satisfaction procuré par le positionnement des activités de maintenance.

Le retard moyen des ordres de fabrication pour les trois types d’ordonnement est donné pour les 20 exemples dans la figure 13 (le pourcentage d’ordres de fabrication en retard donne des résultats très similaires).

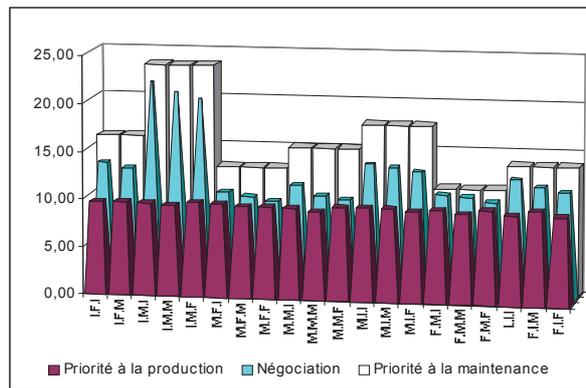


Figure 13. Retard moyen des ordres de fabrication

Comme on pouvait s’y attendre, le retard des ordres de fabrication est minimum quand la production a priorité sur la maintenance (barres sombres au premier plan). Dans ce cas, le retard ne dépend pas des conditions de tests, qui ne concernent que des paramètres des activités de maintenance. Lorsque la maintenance a priorité (barres blanches à l’arrière plan), on peut vérifier que la taille de la fenêtre de positionnement du début des activités de maintenance n’a pas d’influence sur les résultats (les activités de maintenance sont systématiquement planifiées dès que possible) : les résultats sont donc constants pour trois tests consécutifs. On peut aussi vérifier que le retard augmente avec la fréquence des activités de maintenance, et avec l’augmentation de leur durée.

Comme on peut le constater sur la figure 13, la négociation procure bien des résultats intermédiaires entre priorité à la maintenance et priorité à la production. Le gain en terme de retard n'est pas très important dans les cas très contraints (tests 3 à 5), mais il l'est davantage pour les tests « intermédiaires » (tests 6 à 14). Bien sûr, nous allons vérifier dans la suite que cette amélioration n'est obtenue qu'au prix d'un moins bon positionnement des activités de maintenance.

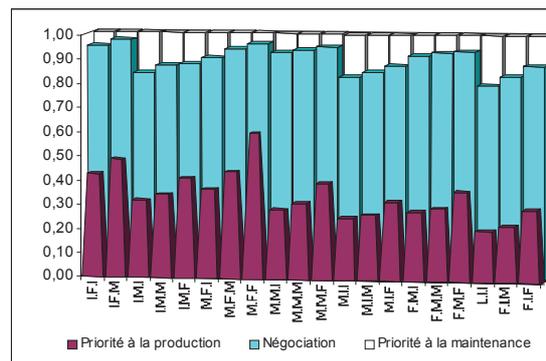


Figure 14. Satisfaction procurée par le positionnement des activités de maintenance

Le degré moyen de satisfaction procuré par le positionnement des activités de maintenance est proposé dans la figure 14. Ce degré est évidemment de 1 quand la maintenance est prioritaire (barres blanches de l'arrière plan). On peut aussi constater que la satisfaction est améliorée de manière importante par la négociation : la satisfaction moyenne sur l'ensemble des tests passe de 0,3 (priorité à la production) à 0,85 (négociation). La satisfaction moyenne augmente quand les contraintes sur le positionnement des activités de maintenance se relâchent, ce qui se traduit par des « marches » ascendantes sur trois test consécutifs. Le domaine d'intérêt de la négociation peut ainsi être vérifié en corrélant les figures 13 et 14 : dans les test 3 à 5, qui sont les cas les plus contraints, l'amélioration du positionnement des activités de maintenance implique l'acceptation d'un retard moyen des ordres de fabrication proche du maximum. Dans le cas des tests présentant davantage de degrés de liberté (par exemple les tests 6 à 14), l'augmentation du retard des ordres de fabrication reste limitée tandis que la satisfaction procurée par le positionnement des activités de maintenance croît de manière importante. Comme le suggérerait le bon sens, la négociation est particulièrement intéressante quand chaque partenaire a suffisamment de degrés de liberté pour la négociation.

La distribution des degrés de satisfaction procurés par le positionnement des activités de maintenance est proposée dans les figures 15a (cas de la priorité à la production) et 15b (négociation). On peut constater que dans le premier cas, la

majorité des activités de maintenance ont un positionnement procurant une satisfaction nulle, tandis que 85 % de ces activités ont un positionnement pleinement satisfaisant dans le cas de la négociation.

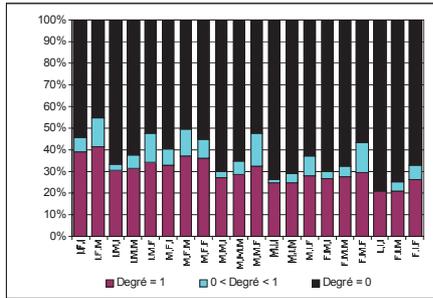


Figure 15a. Distribution du degré de satisfaction du positionnement des activités de Maintenance – priorité à la production

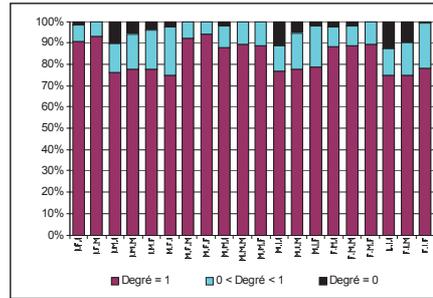


Figure 15b. Distribution du degré de satisfaction du positionnement des activités de maintenance – négociation

8. Conclusion

La planification des activités de maintenance préventive dans des fenêtres temporelles données peut perturber l'ordonnement des ordres de fabrication, mais est indispensable en vue d'assurer une disponibilité à long terme des ressources de production, en particulier lorsque des activités de maintenance sont souvent requises. Ces activités de maintenance peuvent être réalisées sur les machines, mais peuvent aussi concerner les outils ou outillages, les changements de bains dans des processus de traitements ou des activités de nettoyage dans des processus salissants, comme la peinture ou l'édition. Dans ce contexte, le paradigme multiagent peut fournir un cadre d'implémentation permettant de modéliser le processus de négociation entre les fonctions production et maintenance. Nous avons montré dans cet article comment la logique floue pouvait fournir l'outil nécessaire à la modélisation des degrés de liberté mis en jeu dans la négociation, ce cadre respectant la réalité industrielle. De nouveaux développements sont actuellement en cours, afin de définir des cadres de négociation impliquant d'autres fonctions. Deux axes de travail nous semblent particulièrement prometteurs : la coopération entre ressources humaines et production d'une part, en particulier du fait de la tendance actuelle à l'annualisation du temps de travail, et la coopération entre gestion des approvisionnements et production. L'environnement RAMSES II pouvant coordonner l'ordonnement de plusieurs ateliers, ce dernier cas donnerait la possibilité de traiter des problèmes de gestion de la chaîne logistique intégrée avec une approche par négociation qui nous paraît particulièrement prometteuse.

9. Bibliographie

- Archimède B., "A multi-agent scheduling method for the processing of dynamic routings", *IMACS-IEEE MultiConference on Computational Engineering, in Systems Applications*, P. Borne, M. Ksouri, A. E. Kamel Eds, April 1-4, 1998.
- Archimède B., Coudert T., "Reactive scheduling using a multi-agent system: the SCEP framework", *International Journal Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 14, No. 5, p. 667-683, October 2001.
- Archimède B., Coudert T., « Ordonnancement des systèmes flexibles de production. Une approche coopérative basée sur le modèle d'agents SCEP », *APII-JESA*, Vol. 35, No. 9, p. 1029-1054, 2001.
- Ashayeri J., Teelen A., Selen W., "A production and maintenance planning model for the process industry", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 12, p. 3311-3326, 1996.
- Ayel J., "Concurrent Decisions in Production Management", *Journal of Integrated Computer-Aided Engineering*, Special Issue on AI in manufacturing and robotics, 1994.
- Barnett K. W., Blundell J. K., "Trade Demarcations in Maintenance: Determination of Optimum Crew Sizes by the Monte-Carlo Simulation Technique", *Terotechnology*, Vol. 2, p. 147-155, 1981.
- Basker B. A., Husband T. M., "Simulating Multi-skill Maintenances: A Case Study", *Maintenance Management International*, Vol. 3, p. 173-182, 1982.
- Boitel D., Hazard C., *Guide de la maintenance*, Nathan, 1987.
- Bouchon-Meunier B., *La logique floue*, Presses Universitaires de France, Collection « Que sais-je? », 1993.
- Brandolese M., Franci M., Pozzetti A., "Production and maintenance integrated planning", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 7, p. 2059-2075, 1996.
- Coudert T., Archimède B., Grabot, B., « Un système multiagent pour la coopération production/maintenance », *Actes de la deuxième conférence francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'99)*, Georges Habchi and Alain Haurat (eds), Publications de SCS International, Annecy, 6-8 octobre 1999.
- De Carvalho S. V., Noyes D., "A Markov model for the optimization of a maintenance system with a performance constraint", *Analys of the Brazilian Symposium on Operations Research*, Rio de Janeiro, Brasil, July 26-28, p. 1355-1360, 1996.
- Deniaud S., Zerhouni N., El Moudni A., Morel F., « Planification de la maintenance préventive d'une ligne de fabrication d'Alstom », *APII-JESA*, Vol. 33, No. 3, p. 227-250, 1999.
- Dillenseger B., « Une approche multi-agents des systèmes de bureautique communicante », Thèse de l'université de Caen, novembre 1996.
- Dubois D., "An application of fuzzy arithmetic to the optimization of industrial machining process", *Mathematical Modelling*, Vol. 9, No. 6, p. 461-475, 1987.

- Dubois D., Prade H., "Processing fuzzy temporal knowledge", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 19, No. 4, p. 729-743, 1989.
- ECOSIP (Cohendet P., Jacot J. H., Lorino P.), « Cohérence, pertinence et évaluation », *Economica*, Collection « Gestion », Paris, 1996.
- Erschler J., Roubellat F., Vernhes J.-P., "Finding some essential characteristics of the feasible solutions for a scheduling problem", *Operations Research*, No. 24., 1976.
- Fargier H., "Fuzzy scheduling : Principles and Experiments", *Fuzzy Information Engineering : a guided tour of applications*, Eds. Dubois D., Prade H., Yager R. R., John Willey & Sons, Inc., 1997.
- Fortemps P., "Introducing Flexibility in scheduling: the Preference Approach", in *Scheduling Under Fuzziness*, R. Slowinski and M. Hapke Eds, Physica-Verlag, Heidelberg, 2000.
- Fox M. S., *Constraint-Directed search: A case study of job-shop scheduling*, Pitman, 1987.
- Gits C. W., "Structuring Maintenance Control Systems", *International Journal of Operation and Production Management*, Vol. 14, No. 7, p. 5-17, 1994.
- Grabot B., "Objective Satisfaction Assessment using Neural Nets for Balancing Multiple Objectives", *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 9, p. 2377-2395, 1998.
- Hammer M., Champy J., *Reengineering the corporation: a manifesto for business revolution*, HarperBusiness, New York, 1994.
- Ishibuchi H., Murata T., "Flowshop scheduling with fuzzy due date and fuzzy processing time", *Scheduling Under Fuzziness*, R. Slowinski and M. Hapke Eds, Physica-Verlag, Heidelberg, 2000.
- Joshi S., Gupta R., "Scheduling of routine maintenance using production schedules and equipment failure history", *Computer & Industrial Engineering*, Vol. 10, No. 1, p. 11-20, 1986.
- Kelly C. M., Mosier C. T., Mahmoodi F., "Impact of maintenance policies on the performance of manufacturing cells", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 3, p. 767-787, 1997.
- Kenne J. P., Gharbi A., "Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions", *Production Planning and Control*, Vol. 11, No. 6, p. 581-588, 2000.
- Kerr R. M., Walker R. N., "A Job Shop Scheduling System based on Fuzzy Arithmetic", In *Proceedings of the 3rd International Conference on Expert Systems and the Leading Edge in Production and Operation Management*, Hilton Head Isl., South Carolina, USA, 1989.
- Kouiss K., Pierreval H., « Systèmes multiagents : directions actuelles pour les systèmes de production », *Actes du congrès international de génie industriel de Montréal*, p. 2029-2038, 1995.
- Liu J., Sycara K. P., "Distributed problem solving through co-ordination in a society of agents", *Proceedings of the 13th International Workshop on DAI*, Seattle, WA, USA, July, 1994.

- Lorino P., *Le contrôle de gestion stratégique : la gestion par activité*, Editions Dunod, Paris, 1991.
- Maturana F., Shen W., Norrie D. H., "Metamorph: an adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 10, p. 2159-2173, 1999.
- Miyashita K., "CAMPS: a constraint-based architecture for multiagent planning and scheduling", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 9, p. 145-154, 1998.
- Parunak H. V. D., "Manufacturing experience with the Contract Net", *Distributed Artificial Intelligence*, M. N. Hunds (Ed.), p. 285-310, 1987.
- Paté-Cornell M. E., Lee H. L., Tagaras G., "Warning of Malfunction: The Decision to Inspect and Maintain Production Process on Schedule on or Demand", *Management Science*, Vol. 3, No. 10, October, p. 1277-1290, 1987.
- Paz N. M., Leigh W., "Maintenance scheduling: issues, results and research needs", *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 14, No. 8, p. 47-69, 1994.
- Rishel T. D., Christy D. P., "Incorporating maintenance activities into production planning; integration at the master schedule versus material requirement level", *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 2, p. 421-446, 1996.
- Saad A., Kawamura K., Biswas G., "Performance Evaluation of Contract Net-Based Heterarchical Scheduling for Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Automation and Soft Computing*, Special Issue on Intelligent Manufacturing Planning and Shopfloor Control, No. 3, p. 233-252, 1997.
- Sanmarti E., Espuna A., Puigjaner L., "Batch production and preventive maintenance scheduling under equipment uncertainty", *Computer Chemical Engineering*, Vol. 21, No. 10, p. 1157-1168, 1997.
- Schäfer K., Patrity V., Charpentier P., Martin P., Spath D., "The Multi-Agent Approach in Scheduling and Control of Manufacturing Systems", *Proceedings of the First International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents Technology*, The Westminster Central Hall, London, p. 22-24, April 1996.
- Shen W., Norrie D. H., "Agent-based systems for intelligent manufacturing: a state of the art survey", *Knowledge and Information Systems*, Vol. 1, No. 2, p. 129-156, 1999.
- Smith R. G., "The Contract-Net Protocol: high level communication and control in a distributed problem solver", *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-29, No. 12, p. 1104-1113, 1980.
- Smith R. G., "The Contract Net Protocol", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, No. 2, p. 289-328, 1990.
- Smith S. F., "Knowledge-Base Production Management: Approaches, Results and Prospectives", *Production Planning and Control*, Vol. 4, No. 3, p. 350-308, 1992.

- Sohier C., Denis B., Lesage J. J., "Applying eco problem solving to the control of an adaptive manufacturing cell", *Proceedings of CESA'96 Multiconference on Computational Engineering in systems applications*, Lille, France, July 9-12, 1998.
- Swanson L., "The impact of new production technologies on the maintenance function: an empirical study", *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 4, p. 849-869, 1999.
- Tranvouez E., Espinasse B., Chirac J.-P., "A Multi-Agent Based Scheduling System: a Co-operative and Reactive Approach", *9th Symposium on Information Control in Manufacturing*, Nancy-Metz, France, June 22-24, *Advances in Industrial Engineering*, Vol. 3, IFAC, 1998.
- Trentesaux D., Moray N., Tahon C., "Integration of the Human Operator into Responsive Discrete Production Management Systems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 109, No. 2, p. 342-361, 1998.
- Weinstein L., Chung C. H., "Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment", *Computers and Operations Research*, No. 26, p. 1059-1074, 1999.
- Zadeh L. A., "Fuzzy sets", *Information and control*, Vol. 8, p. 338-353, 1965.
- Zülch G., Grobel T., Jonsson U., "Indicators for the Evaluation of Organizational Performance", *IFIP WG 5.7 workshop on Benchmarking-Theory and Practice*, Trondheim, Norway, July 16-18, 1994.